

TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS PERFORMA SISTEM KENDALI ANFIS TERHADAP
FUZZY DAN PID PADA APLIKASI SISTEM SUSPENSI AKTIF
MODEL SEPEREMPAT KENDARAAN**

TOMMY

NRP 02111840000119

Dosen Pembimbing

M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D.

NIP 198204142010121001

Program Studi Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS PERFORMA SISTEM KENDALI ANFIS TERHADAP
FUZZY DAN PID PADA APLIKASI SISTEM SUSPENSI AKTIF
MODEL SEPEREMPAT KENDARAAN**

TOMMY

NRP 02111840000119

Dosen Pembimbing

M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D

NIP 198204142010121001

Program Studi Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TM184835

**PERFORMANCE ANALYSIS OF ANFIS CONTROL SYSTEM
AGAINST FUZZY AND PID IN THE APPLICATION OF
ACTIVE SUSPENSION IN QUARTER VEHICLE MODEL**

TOMMY

NRP 02111840000119

Advisor

M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D

NIP 198204142010121001

Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

(This page is intentionally left blank)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERFORMA SISTEM KENDALI ANFIS TERHADAP FUZZY DAN PID PADA APLIKASI SISTEM SUSPENSI AKTIF UNTUK MODEL SEPEREMPAT KENDARAAN

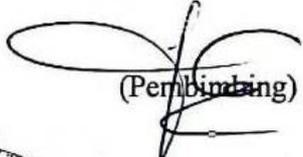
TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

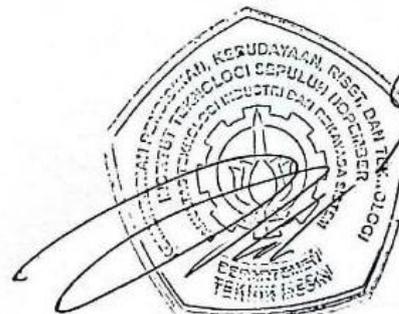
Oleh : **Tommy**
NRP. 0211184000119

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

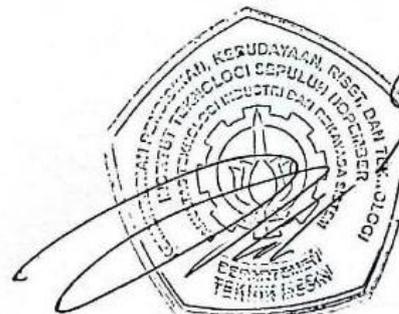
1. Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.
NIP. 198204142010121001
2. Dinny Harnany, S.T., M.Sc.
NIP. 198905132019032013
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
NIP. 198006272012121003
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.
NIP. 198604012015041001


(Pembimbing)


(Penguji 1)


(Penguji 2)


(Penguji 3)



SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

PERFORMANCE ANALYSIS OF ANFIS CONTROL SYSTEM AGAINST FUZZY AND PID IN THE APPLICATION OF ACTIVE SUSPENSION IN QUARTER VEHICLE MODEL

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of bachelor of engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Departement of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

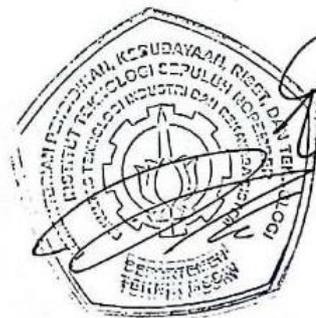
By : **Tommy**
NRP. 0211184000119

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Mohammad Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng.,Ph.D.
NIP. 198204142010121001
2. Dinny Harnany, S.T., M.Sc.
NIP. 19890513201932013
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
NIP. 198006272012121003
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.
NIP. 198604012015041001

 (Advisor)

 (Examiner 1)

 (Examiner 2)

 (Examiner 3)

SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally left blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

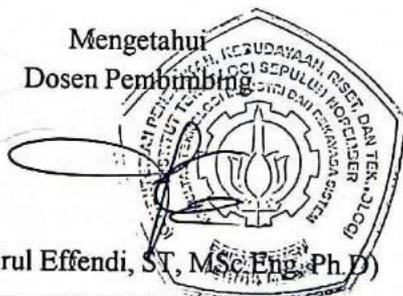
Nama mahasiswa/NRP : Tommy/ 02111840000119
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing/NIP : M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D/
198204142010121001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Performa Sistem Kendali Anfis Terhadap Fuzzy Dan Pid Pada Aplikasi Sistem Suspensi Aktif Untuk Model Seperempat Kendaraan” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Mengetahui
Dosen Pembimbing

(M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D)
NIP. 198204142010121001



Surabaya, Juli 2022

Mahasiswa


(Tommy)

NRP.02111840000119

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

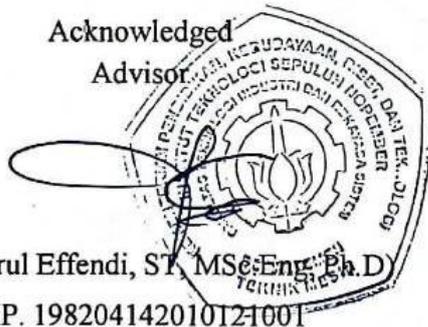
Name of Student /NRP : Tommy/ 02111840000119
Department : Teknik Mesin
Advisor/NIP : M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D/
198204142010121001

Hereby declare that the Final Project with the title of “Performance AnalysisOf Anfis Control System Against Fuzzy And Pid In The Application Of Active Suspension In Quarter Vehicle Model” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut TeknologiSepuluh Nopember.

Surabaya, July 2022

Acknowledged
Advisor



(M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D)
NIP. 198204142010121001

Student

(Tommy)
NRP.02111840000119

(This page is intentionally left blank)

ANALISIS PERFORMA SISTEM KENDALI ANFIS TERHADAP FUZZY DAN PID PADA APLIKASI SISTEM SUSPENSI AKTIF UNTUK MODEL SEPEREMPAT KENDARAAN

Nama Mahasiswa/ NRP : Tommy/ 02111840000119
Departemen : Teknik Mesin FTI - RS
Dosen Pembimbing : M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D

ABSTRAK

Sistem suspensi merupakan bagian paling penting yang mempengaruhi kenyamanan penumpang saat dihadapkan pada medan jalanan yang kasar dan tidak terduga. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, sistem suspensi pasif, semi aktif maupun aktif digunakan untuk memaksimalkan kualitas berkendara. *Passive Suspension System/* sistem suspensi pasif menggunakan peredam tradisional untuk menyerap energi getaran, sistem ini tidak memerlukan daya tambahan, dan saat ini, *passive suspension system* merupakan sistem suspensi yang paling sering digunakan pada dunia otomotif. Suspensi semi-aktif/ *Semi-Active suspension system* menggunakan *damper/* peredam yang dapat dikontrol dan disesuaikan dengan kebutuhan. *Active Suspension System/* sistem suspensi aktif mampu menghasilkan kualitas berkendara yang lebih baik dibandingkan dengan sistem suspensi pasif, sistem suspensi aktif menggunakan daya tambahan untuk aktuator seperti aktuator *electromagnetic*, silinder hidrolik, maupun mekanisme lainnya yang diletakkan secara paralel dengan sistem suspensi pasif. Aktuator ini akan digunakan untuk untuk mengontrol jarak antar roda dengan badan mobil dengan mendorong ataupun menarik badan kendaraan untuk mengurangi getaran yang dirasakan oleh pengendara/ penumpang pada kondisi jalan yang tidak rata.

Pada penelitian ini, *Active Suspension System/* sistem suspensi aktif dengan kendali ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*), akan dibandingkan dengan kendali FLC (*Fuzzy Logic Controller*) pada model kendaraan *quarter-car* yang berasal dari jurnal referensi “*Simulation of PID and fuzzy logic controller for integrated seat suspension of a quarter car with driver model for different road profiles*” yang ditulis oleh S. Rajendiran, and P. Lakshmi (2016). Kendali ANFIS menggunakan parameter *input* berupa *error* dan derivatif *error* dari percepatan kepala pengemudi mobil (*Head Acceleration*), dan parameter *outputnya* adalah besarnya gaya dari kendali yang digunakan (*actuation force*), serta performa akan dinilai dari respons percepatan kepala pengemudi. Kendali ANFIS akan diciptakan berdasarkan data simulasi terhadap kendali PID, dimana parameter kendali PID akan diciptakan dengan PID (*Proportional Integral Derivative*) *Tuner*. Respons dari percepatan kepala pengemudi dari kedua sistem kendali tersebut terhadap *random road profile* dan *single bump* akan di komparasi untuk mencari dan menentukan jenis kendali aktif terbaik pada *active suspension system*.

Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan bahwa baik pada kontur jalan acak maupun kontur jalan polisi tidur, performa ANFIS memiliki performa yang paling unggul dengan persentase reduksi nilai RMS sebanyak 69,74%, pada kontur jalan acak, dan 88.62% pada kontur jalan polisi tidur.

Kata kunci: *sistem suspensi aktif (active suspension system), quarter-car model, PID, ANFIS, FLC*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

PERFORMANCE ANALYSIS OF ANFIS CONTROL SYSTEM AGAINST FUZZY AND PID IN THE APPLICATION OF ACTIVE SUSPENSION IN QUARTER VEHICLE MODEL

Student Name/ NRP : Tommy/ 0211184000119
Department : Mechanical Engineering FTI - RS
Advisor : M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D

ABSTRACT

Suspension system is the most important part that affects passenger comfort when faced with rough and unpredictable road terrain. To overcome these problems, passive, semi-active and active suspension systems are used to maximize driving quality. Passive Suspension System uses traditional dampers to absorb vibration energy, this system does not require additional power, and currently, the passive suspension system is the most widely used across automotive industry. Semi-Active suspension system uses a damper that can be controlled and adjusted its parameters depending on the condition given. Active Suspension System can produce a better driving quality compared to passive suspension systems, active suspension systems use additional power for actuators such as electromagnetic actuators, hydraulic cylinders, or other mechanisms that are placed in parallel with the passive suspension system. This actuator will be used to control the distance between the wheels and the car body by pushing or pulling the vehicle body to reduce the vibration felt by the driver/passenger on uneven road conditions.

In this study, the Active Suspension System with ANFIS control (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) will be compared with the FLC (Fuzzy Logic Controller) on a quarter-car vehicle model from the reference journal "Simulation of PID and fuzzy logic controller for integrated seat suspension of a quarter car with driver model for different road profiles" written by S. Rajendiran, and P. Lakshmi (2016). ANFIS uses *input* parameters in the form of errors and error derivatives from the head acceleration of the car driver (Head Acceleration), and the output parameter is the magnitude of the control force used (actuation force), and performance will be assessed from the acceleration response of the driver's head. ANFIS control will be created based on simulation data on PID control (Proportional Integral Derivative), where PID control parameters will be created with PID Tuner. The response of the driver's head acceleration from the two control systems to the random road profile and single bump will be compared to find and determine the best type of active control in the active suspension system.

The results obtained indicate that both on the contour of the random road and the contour of the speed bump road, the performance of ANFIS has the most superior performance by reducing the RMS value by 69.74% on the random road contour, and 88.62% on the speed bump road contour.

Keywords: active suspension system, quarter-car model, PID, ANFIS, FLC

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkah dan izin-Nya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan yang baik ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materiil dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, antara lain:

1. Herry Fu, Merry dan keluarga yang senantiasa memberi dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang selalu memberikan saran, arahan, motivasi, dan ilmunya yang sangat bermanfaat kepada penulis. Terima kasih atas dedikasi dan waktu yang telah diberikan.
3. Ibu Dinny Harnany, S.T., M.Sc., Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc., Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. selaku dosen penguji Tugas Akhir penulis. Terima kasih atas waktu dan saran-saran yang telah diberikan.
4. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis dalam mempelajari ilmu teknik mesin dan juga ilmu kehidupan yang sangat luas ini.
5. Felysia Isman yang telah menemani penulis selama kurang lebih 3 tahun dalam suka maupun duka dan selalu mendukung kegiatan penulis.
6. Rekan-rekan grup *P a r a B g s t* dan TPKB yang telah menemani penulis dalam mengarungi pengalaman-pengalaman seru selama kurang lebih 4 tahun terakhir. Terima kasih dan sampai jumpa di pertemuan seru selanjutnya.
7. Keluarga M61 yang telah memberi pengalaman dan pembelajaran berharga kepada penulis selama berkuliah di Teknik Mesin ITS yang sama-sama kita cintai.
8. Seluruh civitas akademika ITS yang baik dan ramah.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan

Surabaya, Juli 2022



Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	xiii
ABSTRACT	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.5.1 Bagi Penulis.....	3
1.5.2 Bagi Pembaca	3
BAB II	5
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Sistem Suspensi	6
2.2.1 Sistem Suspensi Pasif	7
2.2.2 Sistem Suspensi Semi – Aktif	8
2.2.3 Sistem Suspensi Aktif.....	8
2.3 Pemodelan Persamaan Kendaraan	9
2.4 Profil Jalan Simulasi	11
2.5 Sistem Kendali	12
2.5.1 Kendali PID	12
2.5.2 Kendali Fuzzy Logic Controller (FLC)	14
2.5.3 Jaringan Saraf Tiruan (Artificial Neural Network)	19
2.5.4 Kendali ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System).....	23
2.6 Standar Kenyamanan ISO 2631	25
BAB III	27
3.1 Diagram Alir Penelitian	27
3.1.1 Studi Literatur.....	28
3.1.2 Pemodelan Kendaraan dan Profil Jalan	28
3.1.3 Pemodelan Kendali PID dan ANFIS	32
3.1.4 Simulasi Membership Function ANFIS	37
3.1.5 Verifikasi dan Komparasi Hasil	37
BAB IV	39
4.1 Performa sistem kendali suspensi aktif terhadap profil jalan acak	39

4.2	Performa sistem kendali suspensi aktif terhadap profil jalan polisi tidur	46
BAB V	56
5.1	Kesimpulan	56
5.2	Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	58
BIODATA PENULIS	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gambar Suspensi Mobil.....	7
Gambar 2.2 Sistem Suspensi Pasif.....	7
Gambar 2.3 Sistem Suspensi Semi – Aktif.....	8
Gambar 2.4 Sistem Suspensi Aktif.....	9
Gambar 2.5 Model seperempat kendaraan.....	10
Gambar 2.6 <i>Block diagram</i> PID.....	13
Gambar 2.7 <i>Block Diagram</i> sistem suspensi kendaraan.....	14
Gambar 2.8 Sistem komputasi pada umumnya.....	15
Gambar 2.9 Sistem Komputasi Fuzzy.....	15
Gambar 2.10 <i>Block diagram</i> FLC.....	16
Gambar 2.11 lapisan pada jaringan saraf tiruan.....	20
Gambar 2.12 <i>Single Layer Neural Network</i>	20
Gambar 2.13 <i>Multilayer Neural Network</i>	21
Gambar 2.14 Permasalahan pada data dan metode <i>pre-processing</i> data.....	22
Gambar 2.15 Arsitektur ANFIS.....	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	28
Gambar 3.2 Rangkaian Simulink untuk <i>quarter-car model</i> berdasarkan referensi.....	30
Gambar 3.3 Profil jalan Acak.....	31
Gambar 3.4 Profil jalan polisi tidur.....	31
Gambar 3.5 Rangkaian Simulink untuk kontur jalan acak.....	32
Gambar 3.6 Rangkaian Simulink untuk kontur jalan polisi tidur.....	32
Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Pemodelan Kendali PID dan ANFIS.....	33
Gambar 3.8 Block diagram sistem kendali loop tertutup sederhana.....	34
Gambar 3.9 Rangkaian Simulink <i>quarter-car model</i> dengan sistem kendali Passive.....	35
Gambar 3.10 Rangkaian Simulink <i>quarter-car model</i> dengan sistem kendali PID.....	35
Gambar 3.11 Rangkaian Simulink <i>quarter-car model</i> dengan sistem kendali Fuzzy.....	35
Gambar 3.12 Rangkaian Simulink <i>quarter-car model</i> dengan sistem kendali ANFIS.....	36
Gambar 3.13 Rangkaian Simulink yang digunakan untuk menormalisasi <i>input</i> pada sistem kendali ANFIS.....	36
Gambar 3.14 Performa kendali FLC dan PID berdasarkan penelitian (Rajendiran & Lakshmi, 2016) pada masukan profil jalan acak.....	37
Gambar 3.15 Performa kendali FLC dan PID berdasarkan penelitian (Rajendiran & Lakshmi, 2016) pada masukan profil jalan polisi tidur.....	38
Gambar 4.1 Parameter pada sistem kendali PID.....	39
Gambar 4.2 Perbandingan Respon sistem kendali PID dan FLC terhadap kontur jalan acak.....	40
Gambar 4.3 Histogram data sebelum proses normalisasi.....	40
Gambar 4.4 Histogram data setelah proses normalisasi.....	41
Gambar 4.5 Hasil pelatihan/ <i>training</i> ANFIS dengan parameter MF jenis Gauss Bell dan berjumlah 7 MF.....	42
Gambar 4.6 Perbandingan Respons Kendali PID dan ANFIS terhadap kontur jalan acak....	43
Gambar 4.7 Respons kendali ANFIS, FLC, dan Passive Suspension terhadap kontur jalan acak.....	43
Gambar 4.8 <i>Error</i> berupa parameter <i>input</i> yang berada diluar rentang normalisasi.....	45
Gambar 4.9 Hasil analisis parameter <i>input</i> yang telah dinormalisasi.....	45
Gambar 4.11 Parameter pada kendali PID.....	47
Gambar 4.12 Perbandingan Respons sistem kendali PID dan FLC terhadap kontur jalan polisi tidur.....	47

Gambar 4.13 Histogram data sebelum proses normalisasi	48
Gambar 4.14 Histogram data yang menggunakan metode normalisasi biasa.....	48
Gambar 4.15 Histogram data setelah menggunakan metode <i>z-score normalization</i>	49
Gambar 4.16 Histogram data setelah proses normalisasi	49
Gambar 4.17 Hasil pelatihan/ <i>training</i> ANFIS	50
Gambar 4.18 Perbandingan Respons Kendali PID dan ANFIS Terhadap Kontur Jalan Polisi Tidur	51
Gambar 4.19 Respons kendali ANFIS, FLC, dan Passive Suspension terhadap kontur jalan polisi tidur.....	51
Gambar 4.20 <i>Error</i> berupa parameter <i>input</i> yang berada diluar rentang normalisasi	53
Gambar 4.21 Hasil analisis parameter <i>input</i> yang telah dinormalisasi	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter kendaraan model <i>quarter-car</i>	11
Tabel 2.2 Respons sistem kendali PID terhadap perubahan parameter	13
Tabel 2.3 Logika operasi kendali Fuzzy	16
Tabel 2.4 Contoh <i>decision matrix</i> pada sistem pelayanan di rumah makan	17
Tabel 2.5 <i>fuzzy logic rule</i> pada kendali sistem suspensi aktif.....	19
Tabel 3.1 Performa passive suspension system, kendali FLC berdasarkan penelitian (Rajendiran & Lakshmi, 2016) pada kontur	38
Tabel 4.1 <i>Design of Experiment</i> pengujian performa ANFIS dengan tipe dan jumlah MF yang berbeda terhadap nilai RMS HA	41
Tabel 4.2 Perbandingan nilai RMS antara jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) dengan hasil simulasi pada kontur jalan acak.....	44
Tabel 4.4 <i>Design of Experiment</i> pengujian performa ANFIS dengan tipe dan jumlah MF yang berbeda terhadap nilai RMS HA	50
Tabel 4.5 Perbandingan nilai RMS antara jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) dengan hasil simulasi pada kontur jalan polisi tidur.....	52

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sistem suspensi merupakan salah satu sistem yang berpengaruh signifikan pada kenyamanan berkendara dan sudah banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mencapai kenyamanan berkendara yang ideal, kondisi nyaman yang ideal bagi seorang pengendara adalah badan kendaraan yang tidak bergerak walaupun mendapat gangguan dari luar. Tujuan utama dari sistem suspensi pada kendaraan adalah untuk melindungi *chassis*/ kerangka badan kendaraan dari kekasaran jalan, sehingga dapat memberikan kenyamanan berkendara, dan meningkatkan stabilitas dalam berkendara. Untuk mencapai kondisi ideal tersebut, kendaraan diberi pegas dan peredam di antara badan kendaraan dan roda kendaraan. Sistem pegas dan peredam ini disebut juga sebagai sistem suspensi. Secara umum terdapat tiga jenis sistem suspensi yaitu, sistem suspensi pasif, sistem suspensi semi-aktif dan sistem suspensi aktif.

Saat ini, Sebagian besar kendaraan komersial masih menggunakan sistem suspensi pasif yang memiliki komponen utama berupa pegas (*spring*), dan peredam kejut (*shock absorber*). Sistem suspensi tersebut merupakan sistem suspensi pertama yang dikenal dengan sistem suspensi pasif/ *passive suspension system*, sistem suspensi ini didesain dengan asumsi model kendaraan linear, sedangkan pada kenyataannya, model kendaraan tidak pernah linear. Model kendaraan memiliki kompleksitas yang sangat tinggi dengan perubahan tidak terduga yang dapat terjadi setiap waktu, beberapa penyebab perubahan tersebut adalah kondisi permukaan jalan dan kondisi operasi/ berkendara yang berbeda – beda. Hal tersebut menyebabkan sistem suspensi pasif yang di desain menggunakan asumsi model kendaraan linear menjadi kurang optimal dalam aplikasinya baik dari segi kinerja maupun ketahanan yang dimiliki.

Upaya yang dilakukan untuk menjawab permasalahan yang ditimbulkan dari sistem suspensi pasif adalah dengan mendesain ulang sistem suspensi agar memiliki kemampuan adaptif terhadap perubahan tersebut. Sistem suspensi aktif, dan semi-aktif digagaskan untuk menjawab permasalahan tersebut. Sistem suspensi aktif menambahkan aktuator pada suspensi pasif, aktuator tersebut akan dikendali secara aktif sehingga mampu memberi redaman tambahan untuk membantu suspensi pasif pada kondisi tertentu. Sedangkan sistem suspensi semi aktif menggunakan peredam yang dapat dikendali dan disesuaikan dengan kebutuhan, sehingga daya redam suspensi semi aktif akan memiliki nilai yang berbeda bergantung pada kondisi permukaan jalan dan kondisi operasi/ berkendara. Aktuator pada suspensi aktif bekerja dengan mengendalikan jarak antara roda dengan badan mobil dengan cara mendorong/ menarik badan mobil sehingga dapat menstabilkan posisi badan mobil di kontur jalan yang tidak rata. Aktuator pada sistem suspensi aktif akan dikendalikan dengan sistem kendali sehingga performa dari sistem suspensi aktif sangat bergantung kepada jenis kendali dan kualitas kendali yang digunakan, sistem kendali yang menjadi pertimbangan pada penelitian ini adalah kendali ANFIS (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*) dengan *database* yang diciptakan melalui simulasi kendali PID (*Proportional Integral Derivative*) dimana parameter kendali yang digunakan sudah di *tuning* melalui fitur *PID Tuner* pada MATLAB. Pemilihan jenis kendali tersebut didasarkan pada penelitian (Changizi & Rouhani, 2011; Moaaz & Ghazaly, 2019) yang memperoleh hasil penelitian bahwa kendali Fuzzy memiliki performa yang lebih stabil pada model kendaraan seperempat kendaraan dibandingkan dengan kendali PID pada parameter percepatan dan perpindahan badan kendaraan, perpindahan roda kendaraan, dan kecepatan badan serta roda kendaraan

(Changizi & Rouhani, 2011). Sedangkan pada penelitian (Moaaz & Ghazaly, 2019), diperoleh bahwa parameter performa percepatan badan kendaraan, *Suspension Working Space* (SWS)/ perpindahan suspensi, dan defleksi roda kendaraan memiliki persentase reduksi yang lebih besar daripada kendali PID. Sedangkan pemilihan kendali ANFIS didasarkan oleh penelitian (Kılıç et al., 2015) yang meneliti kendali kecepatan pada motor induksi, pada penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa kendali ANFIS mampu menghasilkan performa kendali yang lebih baik dibandingkan dengan kendali PI, dan FLC (*Fuzzy Logic Controller*). Kendali ANFIS juga memiliki kemampuan adaptif terhadap variasi parameter yang berbeda yang baik, dan kinerja dinamis yang sangat baik serta kestabilan selama periode sementara dan pembebanan tiba – tiba.

Pada penelitian ini performa dari kendali Fuzzy yang bersumber dari jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) akan diuji pada model kendaraan *quarter-car* dengan *random road profile*, dan *single bump*. Parameter yang akan dibandingkan adalah *Head Acceleration* (HA), selain perbandingan parameter HA terhadap jurnal referensi, akan dilakukan juga perbandingan terhadap standarisasi kenyamanan ISO 2631. Penelitian performa dari kendali tersebut akan dilaksanakan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mencari parameter pada *control* PID melalui proses *tuning* di *toolbox* PID Tuner.
2. Bagaimana mengetahui parameter optimal pada *control* ANFIS dan menyimulasikan kendali ANFIS pada *active suspension system*.
3. Bagaimana melakukan perbandingan performa hasil simulasi dari *control system* FLC, dan ANFIS pada *active suspension system*.
4. Bagaimana respons dari masing – masing sistem kendali terhadap standar kenyamanan ISO 2631

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian yang dilakukan terbatas pada tahap simulasi dan belum sampai pada tahap validasi secara eksperimental.
2. Model persamaan kendaraan yang digunakan adalah model seperempat kendaraan kendaraan/ *quarter – car model*.
3. Parameter Kendaraan, serta kontur jalan acak, dan performa kendali FLC pada *active suspension system* diambil dari jurnal yang ditulis oleh S. Rajendiran S. dan P. Lakshmi dengan judul “*Simulation of PID and Fuzzy Logic Controller for Integrated Seat Suspension of a Quarter Car with Driver Model for Different Road Profiles.*”
4. Parameter penilaian yang menjadi fokus penelitian adalah *Head Acceleration* (HA) sesuai dengan jurnal referensi yang digunakan.
5. Tipe *membership function* (MF) yang akan divariasikan adalah Triangular, Trapezoidal, Gaussian Bell (Gbell), dan Gaussian.
6. Jumlah *epoch*/ pengulangan *training* ANFIS yang dilakukan adalah 100 *epoch*, dan jumlah tersebut akan ditingkatkan jika dirasa perlu untuk menghasilkan model ANFIS yang lebih baik.
7. Jumlah MF yang akan divariasikan adalah 6 sampai dengan 8 MF untuk tiap *input*.

8. Parameter PID Optimal yang akan dicari memiliki batasan pada PID Tuner berupa nilai *phase margin* dari 0 s.d. 90° dan *bandwidth* sebesar 0 s.d. 100 rad/s

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui parameter PID yang optimal untuk kendali pada *active suspension system*
2. Mengetahui performa *control system* ANFIS pada *active suspension system*
3. Mengetahui perbandingan performa kendali pada *active suspension system* terhadap masing – masing kontur jalan.
4. Mengetahui standar kenyamanan pada tiap sistem kendali terhadap ISO 2631.

1.5 Manfaat Penelitian

1.5.1 Bagi Penulis

Manfaat dari Tugas Akhir ini bagi penulis adalah sebagai berikut:

1. Menerapkan ilmu pengetahuan yang dimiliki dalam rangka mengetahui performa hasil *control system* yang terhadap model kendaraan *active suspension system* yang digunakan.
2. Menambah wawasan terkait *active suspension* dan *control* yang digunakan berupa FLC, PID, ANFIS.
3. Mengetahui perbandingan performa sistem kendali FLC, dan ANFIS
4. Mengetahui parameter optimal sistem kendali PID pada *active suspension system*.

1.5.2 Bagi Pembaca

Manfaat dari Tugas Akhir ini bagi pembaca dan pihak terkait adalah sebagai berikut:

1. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan *control system* PID, FLC, ANFIS dan *active suspension system*.
2. Sebagai media penelitian dan pengembangan ilmu pengetahuan khususnya pada bidang *control system* dan *active suspension system*.
3. Sebagai penambah wawasan terkait *active suspension system* dan sistem kendali yang digunakan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II DASAR TEORI

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Seiring dengan perkembangan teknologi, industri otomotif menaruh perhatian khusus pada kenyamanan dan keamanan berkendara selain dari kinerja kendaraan. Sistem suspensi pada kendaraan memiliki peranan penting dalam memberikan pengalaman berkendara yang aman dan nyaman dengan mengisolasi badan kendaraan dari berbagai gangguan di jalan dan memberikan kualitas berkendara yang lebih baik dengan meningkatkan stabilitas berkendara (Gandhi et al., 2017; Sharkawy et al., 2015). Berdasarkan prinsip kerja yang dimiliki, sistem suspensi kendaraan terbagi menjadi 3 sistem, yaitu sistem suspensi pasif, aktif, dan semi – aktif. Sistem suspensi pasif menggunakan pegas dan peredam kejut konvensional untuk meredam energi getaran, dan memiliki parameter yang bersifat tetap dan tidak dapat berubah. Sistem suspensi semi aktif menggunakan pegas dan peredam kejut yang dapat dikendalikan secara eksternal sehingga parameter yang dimiliki dapat berubah sesuai dengan kebutuhan, dan sistem suspensi aktif menggunakan gaya pada aktuator bersamaan dengan pegas dan peredam kejut konvensional dalam sistem kendali *closed – loop*, di mana aktuator akan memberikan gaya kendali yang memadai ke sistem berdasarkan masukan dari berbagai sensor yang terhubung dengannya (Gandhi et al., 2017; Ming et al., 2020)

Performa suspensi semi aktif dan suspensi aktif dengan sistem kendali yang tepat akan lebih baik daripada suspensi pasif, kunci untuk memperoleh kendali yang bagus adalah sifat pembelajaran secara *real-time* terhadap perubahan pada permukaan jalan dan parameter lainnya (Ming et al., 2020). Berdasarkan konsep dan pertimbangan tersebut, pemilihan jenis kendali menjadi salah satu pertimbangan utama, berbagai metode kendali seperti FLC sudah diteliti pada berbagai jurnal (Gandhi et al., 2017; Kothandaraman & Lakshmi, 2010; Pekgökgöz et al., 2010; Shehata et al., 2015), optimasi kendali FLC oleh *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Kothandaraman & Lakshmi, 2010), maupun metode lain seperti *Linear Quadratic Regulator* (LQR) (Gandhi et al., 2017), PID (Gandhi et al., 2017; Talib & Mat Darus, 2013). Penelitian mengenai komparasi antara kendali Fuzzy dan ANFIS untuk masalah pengambilan keputusan pada bidang logistik telah diteliti pada (Özkan & İnal, 2014) dan berdasarkan nilai MSE, diperoleh bahwa kendali ANFIS menghasilkan hasil yang lebih bagus dibandingkan dengan kendali Fuzzy.

Jenis kendali yang akan dipilih pada sistem suspensi aktif adalah kendali ANFIS, dengan *database* yang berasal dari hasil simulasi kendali PID. Kendali PID merupakan jenis kendali penstabil yang paling banyak digunakan pada kebutuhan industri dan penelitian. Kendali PID mengoreksi *error* antara *output* aktual dan *output* yang diinginkan dengan menghasilkan sebuah sinyal kendali yang mengubah *output* aktual menjadi *output* yang diinginkan (Mahmoodabadi & Nejadkourki, 2020). ANFIS atau *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* merupakan gabungan/ kombinasi yang menggunakan sistem kendali FLC dan *Neural Network*, di mana *Neural Network* akan menciptakan MF yang digunakan pada FLC (Senthil Kumar et al., 2018). FLC merupakan sistem logika yang menyediakan metodologi intuitif untuk mengubah *input* yang bersifat *Fuzzy* (*input* yang masih berupa informasi tidak jelas dan belum mengandung nilai asli/ real) menjadi *input crisp* (informasi yang jelas dan mengandung nilai asli/ real (Gandhi et al., 2017). Umumnya terdapat 3 tahapan yang terlibat pada kendali logika *fuzzy* yaitu, fuzzifikasi, desain aturan kendali, dan defuzzifikasi (Pekgökgöz et al., 2010; Sharkawy et al., 2015). Penjelasan lebih lanjut mengenai cara kerja dari masing – masing kendali tersebut akan dijelaskan pada subbab 2.5 sistem kendali.

Tantangan utama dalam sistem suspensi aktif adalah pemodelan kendaraan, perlu dicatat bahwa model sistem kendaraan yang akurat dan sesuai dengan model sebenarnya tidak ada dan untuk mengatasi masalah tersebut, diciptakan metode *free-model* yang tidak bergantung kepada model pada sistem. Pada penelitian ini, *free-model* direpresentasikan oleh kendali FLC yang akan berperan untuk mengendalikan serta menyesuaikan suspensi sesuai dengan pengetahuan dan pengalaman dari para ahli yang mendesain kendali *fuzzy* tersebut. Langkah ini menghindari proses pemodelan kendaraan yang kompleks dan mengaplikasikan pengetahuan manusia secara langsung. Namun proses ini mengabaikan informasi penting dari sistem dan memiliki presisi yang rendah sehingga dapat menghasilkan hasil yang tidak memuaskan. (Wang et al., 2019) Untuk menyempurnakan kendali tersebut, diperlukan kombinasi/ optimasi dengan proses tambahan. Pada penelitian ini, proses optimasi akan dibantu oleh *Neural Network* untuk mengubah proses desain FLC yang sangat bergantung pada pengetahuan dari individu yang merancang kendali tersebut menjadi *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) yang mampu menghasilkan *rule/ MF* paling optimal hanya berdasarkan data yang ada.

Pada penelitian ini, kendali *Fuzzy* yang berasal dari jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) akan diuji terhadap kendali ANFIS dengan *database* yang berasal dari hasil simulasi kendali PID akan diuji pada sistem suspensi aktif untuk model seperempat kendaraan dengan 8 DOF berdasarkan jurnal referensi, parameter yang akan dinilai adalah *Head Acceleration* (HA). Parameter tersebut akan dibandingkan sehingga kita dapat memperoleh wawasan mengenai pemilihan sistem kendali dan metode optimalisasi yang sesuai untuk aplikasi sistem suspensi aktif.

2.2 Sistem Suspensi

Suspensi adalah bagian dinamis dari mobil yang membantu mendukung kemampuan kendaraan untuk mencengkeram jalan, menopang berat kendaraan dari beban statis, dan mengisolasi tubuh dari gangguan yang disebabkan oleh kontur jalan maupun cara mengemudi di jalan. Suspensi kendaraan memiliki peran utama dalam sistem dinamis kendaraan, berkontribusi untuk meningkatkan kenyamanan dan kestabilan dalam berkendara (Hu et al., 2014), dengan kata lain sistem suspensi merupakan sebuah mekanisme yang secara fisik memisahkan badan kendaraan dengan roda kendaraan. Fungsi utama sistem suspensi adalah untuk meminimalkan percepatan vertikal yang tersalurkan pada pengendara yang mampu memengaruhi kenyamanan berkendara secara langsung (Sharkawy et al., 2015). Untuk itu perlu dirancang sistem suspensi yang mampu memberikan peredaman dengan cepat untuk mencapai kenyamanan yang diinginkan. Ada beberapa sistem suspensi yang digunakan dalam aplikasi otomotif yaitu sistem suspensi pasif, semi aktif dan aktif dengan berbagai metode pengendalian.

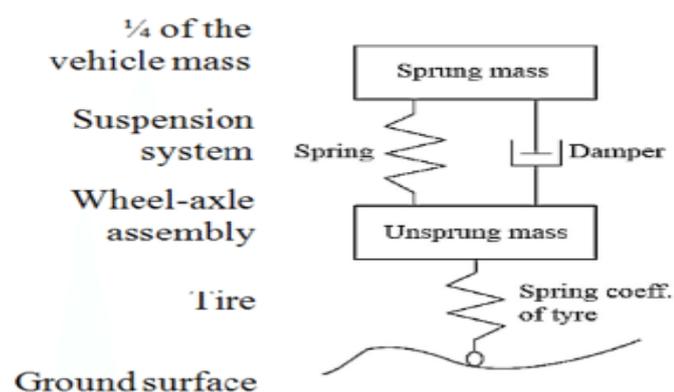
Pada umumnya sistem suspensi terdiri dari beberapa bagian yaitu pegas (*spring*), peredam kejut (*dampner*), dan beban (*mass*), sistem suspensi dipasang di antara badan (kerangka) kendaraan dengan roda. Sistem suspensi dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu sistem suspensi pasif, semi - aktif dan aktif. Gambar sistem suspensi pada mobil dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Gambar Suspensi Mobil
[\(https://wuling.id/en/blog/autotips/8-types-of-car-suspensions/\)](https://wuling.id/en/blog/autotips/8-types-of-car-suspensions/)

2.2.1 Sistem Suspensi Pasif

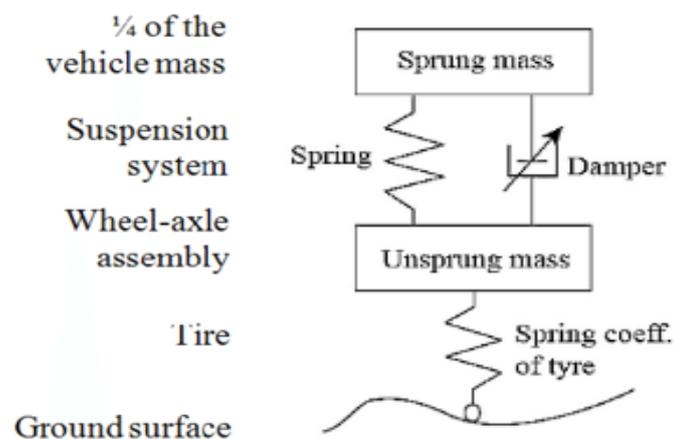
Sistem suspensi pasif hanya tersusun dari elemen pasif, yaitu pegas (*spring*), dan peredam kejut (*damper*). Pada sistem suspensi pasif, nilai konstanta pegas dan peredam kejut bernilai konstan. Sistem suspensi pasif merupakan sistem kendali *open – loop* yang didesain untuk beroperasi pada kondisi tertentu saja. Kekurangan dari sistem suspensi pasif adalah karakteristik dari sistem suspensi pasif bersifat tetap dan tidak dapat disesuaikan dengan kebutuhan, hal tersebut menimbulkan permasalahan dari sistem suspensi pasif yaitu, jika suspensi bersifat *overdamped*, di mana kendaraan tidak dapat meredam permukaan jalan yang tidak rata, ataupun *underdamped* di mana kendaraan menjadi tidak stabil karena getaran yang diterima akan menimbulkan kendaraan berosilasi tidak terkendali (Sharkawy et al., 2015). Keunggulan pada sistem suspensi pasif adalah harga yang murah, sistem yang sederhana, keandalan yang tinggi dan tidak memerlukan daya (Hu et al., 2014). Model seperempat kendaraan dari sistem suspensi pasif dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Sistem Suspensi Pasif
 (Amer et al., 2017)

2.2.2 Sistem Suspensi Semi – Aktif

Sistem suspensi semi aktif terdiri pegas (*spring*) konvensional dan peredam (*damper*) yang terbuat dari material aktif. Keunggulan Suspensi semi – aktif berada pada komponen peredam (*damper*) yang terbuat dari material aktif, hal tersebut menyebabkan nilai peredam yang dapat diatur/dikendalikan. Dengan nilai redaman yang dapat berubah, maka respons getaran yang dihasilkan oleh suspensi juga akan berbeda. Prinsip inilah yang digunakan sebagai dasar untuk kendali sistem suspensi semi-aktif untuk memperoleh tingkat kenyamanan berkendara yang lebih baik. Model seperempat kendaraan untuk Sistem Suspensi Semi Aktif dapat dilihat pada Gambar 2.3

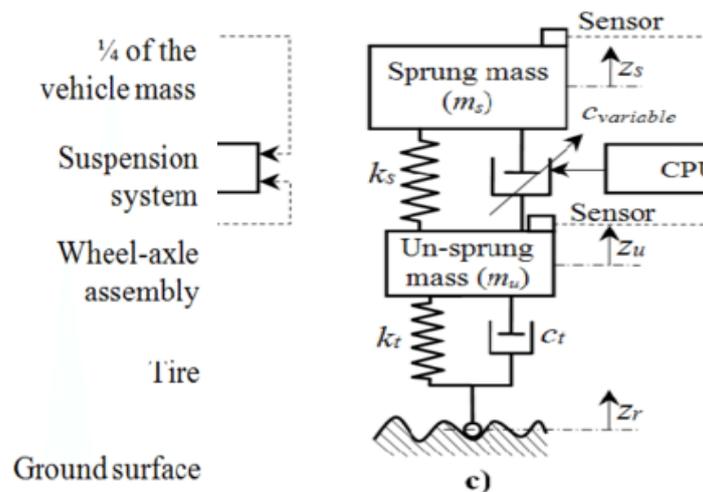


Gambar 2.3 Sistem Suspensi Semi – Aktif
(Amer et al., 2017)

2.2.3 Sistem Suspensi Aktif

Sistem suspensi aktif mampu menghasilkan kualitas berkendara yang lebih baik dengan menggunakan daya tambahan untuk menyediakan peredam kejut yang bergantung terhadap respons sehingga mampu mengontrol kerjanya sendiri sesuai dengan berbagai kondisi jalan. Pada sistem suspensi aktif, aktuator (*linear motor*, *hydraulic cylinder*, dan lainnya) dipasang secara paralel terhadap sistem suspensi pasif, aktuator ini memanfaatkan jarak pada ruang suspensi ketika menarik badan kendaraan ke bawah maupun mendorongnya ke atas untuk meredam getaran yang dihasilkan akibat permukaan jalan yang tidak rata (Pekgökgöz et al., 2010; Singh, 2018).

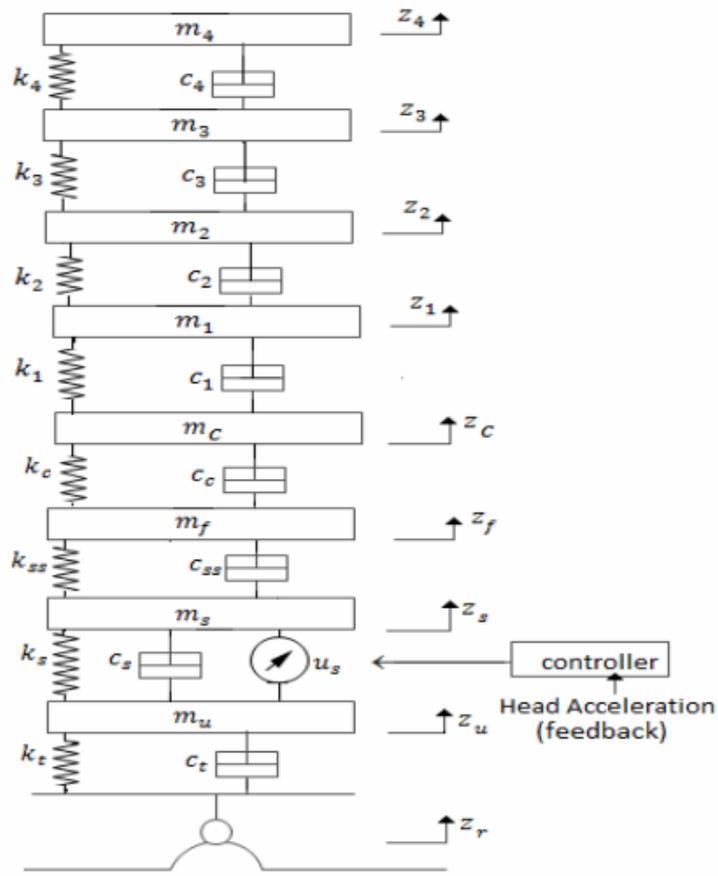
Keunggulan Sistem suspensi aktif adalah kemampuannya dalam memberikan kinerja terbaik dalam rentang operasi yang luas dibandingkan dengan sistem suspensi pasif dan semi aktif. Hal ini dikarenakan sistem suspensi aktif mampu mengubah koefisien kekakuan dan redaman secara bersamaan (Singh, 2018; Wang et al., 2019). Namun sistem suspensi aktif tidak hanya memberikan kinerja terbaik tetapi juga memerlukan jumlah energi yang besar dikarenakan gaya untuk membangkitkan tenaga pada aktuator (Hu et al., 2014). Tetapi walaupun demikian, sistem suspensi aktif memiliki efektivitas dan potensi yang paling besar dalam meningkatkan pengalaman berkendara secara keseluruhan (Wang et al., 2019). Model seperempat kendaraan untuk Sistem Suspensi Aktif dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Sistem Suspensi Aktif
(Amer et al., 2017)

2.3 Pemodelan Persamaan Kendaraan

Pada penelitian ini digunakan model kendaraan seperempat. Model ini digunakan karena sederhana dan mengandung banyak karakteristik penting yang digunakan pada model kendaraan utuh, model ini juga mempermudah proses analisis karakteristik dari sistem suspensi (Moghadam-Fard & Samadi, 2015). Kekakuan dan daya redam pada roda juga akan disederhanakan menjadi *spring* dan *damp* sederhana tanpa mempertimbangkan karakteristik sebenarnya dari roda (Wang et al., 2019). Pada model kendaraan seperempat, kendaraan dibagi menjadi empat bagian dengan asumsi setiap suspensi pada keempat roda kendaraan simetris. Massa kendaraan yang diperhitungkan pada setiap suspensi merupakan masa kendaraan keseluruhan dibagi empat. Model seperempat kendaraan dengan sistem suspensi aktif berdasarkan referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) dapat dilihat pada Gambar 2.5 dengan detail persamaan yang digunakan adalah persamaan 1 – 8.



Gambar 2.5 Model seperempat kendaraan
(Rajendiran & Lakshmi, 2016)

$$M_u \ddot{Z}_u = -k_t(Z_u - Z_r) - c_t(\dot{Z}_u - \dot{Z}_r) + k_s(Z_s - Z_u) + c_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - u_s \quad (1)$$

$$M_s \ddot{Z}_s = -k_s(Z_s - Z_u) - c_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + k_{ss}(Z_f - Z_s) + c_{ss}(\dot{Z}_f - \dot{Z}_s) + u_s \quad (2)$$

$$M_f \ddot{Z}_f = -k_{ss}(Z_f - Z_s) - c_{ss}(\dot{Z}_f - \dot{Z}_s) + k_c(Z_c - Z_f) + c_c(\dot{Z}_c - \dot{Z}_f) \quad (3)$$

$$M_c \ddot{Z}_c = -k_c(Z_c - Z_f) - c_c(\dot{Z}_c - \dot{Z}_f) + k_1(Z_1 - Z_c) + c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_c) \quad (4)$$

$$M_1 \ddot{Z}_1 = -k_1(Z_1 - Z_c) - c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_c) + k_2(Z_2 - Z_1) + c_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) \quad (5)$$

$$M_2 \ddot{Z}_2 = -k_2(Z_2 - Z_1) - c_2(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + k_3(Z_3 - Z_2) + c_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) \quad (6)$$

$$M_3 \ddot{Z}_3 = -k_3(Z_3 - Z_2) - c_3(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) + k_4(Z_4 - Z_3) + c_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_3) \quad (7)$$

$$M_4 \ddot{Z}_4 = -k_4(Z_4 - Z_3) - c_4(\dot{Z}_4 - \dot{Z}_3) \quad (8)$$

Pada pemodelan kendaraan ini, diasumsikan bahwa kekakuan pegas pada suspensi dan ban bersifat linier (Shehata et al., 2015). Pada model kendaraan tersebut, M merupakan massa, Z merupakan perpindahan, c merupakan konstanta peredam pada suspensi mobil. model seperempat kendaraan dijelaskan pada persamaan (1) dan (2) lalu disertai dengan suspensi pada kursi dan pemodelan badan manusia yang berjumlah 6 DOF. *subscripts u*

adalah *unsprung*, *s* adalah *sprung*, *ss* adalah *seat suspension*, *f* adalah *frame*, *c* adalah *cushion*, dan 1-4 adalah pembagian untuk badan manusia yang dibedakan menjadi kaki, tubuh bagian bawah, tubuh bagian atas, dan kepala. Pada pemodelan kendaraan ini, diasumsikan bahwa kekakuan pegas pada suspensi dan ban bersifat linier. Detail parameter dapat dilihat pada tabel 2.1

Tabel 2.1 Parameter kendaraan model *quarter-car*
(Rajendiran & Lakshmi, 2016)

Massa (Kg)	Koefisien Peredam (Ns/m)	Kekakuan Pegas (N/m) $\times 10^3$
M_u	20	C_t 0 k_t 180
M_s	300	C_s 2000 k_s 10
M_f	15	C_{ss} 830 k_{ss} 31
M_c	1	C_c 200 k_c 18
M_1	12.78	C_1 2064 k_1 90
M_2	8.62	C_2 4585 k_2 162.8
M_3	28.49	C_3 4750 k_3 183
M_4	5.31	C_4 400 k_4 310

Pada penelitian ini, parameter performa yang ditinjau adalah percepatan kepala pengemudi, parameter ini dipilih berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh jurnal referensi agar hasil penelitian ini memiliki pembandingan dan dapat diuji dengan jurnal referensi. Performa dari percepatan kepala pengemudi dinilai dengan nilai *Root Mean Square* (RMS) dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i x_i^2} \quad (9)$$

Dengan n adalah jumlah data, dan x_i adalah data yang diambil untuk perhitungan RMS. Nilai RMS dipilih karena nilai RMS memiliki hubungan yang erat dengan kestabilan kendaraan; apabila nilai RMS semakin kecil maka performa yang dimiliki akan semakin bagus karena performa yang dihasilkan memiliki rata – rata yang lebih mendekati ke nilai 0 yang menandakan bahwa sistem berada dalam kondisi stabil.

2.4 Profil Jalan Simulasi

Kontur jalan merupakan *input* utama yang menghasilkan gaya eksitasi pada mobil dan juga sebagai penentu dalam kenyamanan berkendara. Untuk dapat mengetahui performa dari kendali yang diteliti, diperlukan profil jalan yang dapat digunakan untuk mewakili dan menyimulasikan profil jalan. Pada penelitian ini digunakan 2 jenis profil jalan untuk menyimulasikan kondisi operasi sebenarnya, profil jalan acak (*Random Road*), dan profil jalan polisi tidur (*single bump*) terhadap model seperempat kendaraan yang pertama. Secara matematis, *single bump* dapat di *generate* dengan persamaan:

$$Z_r(t) = \begin{cases} \frac{a}{2} \left\{ 1 - \cos \left(\frac{2\pi v_0}{l} t \right) \right\}, & \text{for } 0 \leq t \leq \frac{l}{v_0} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

Di mana a adalah setengah amplitudo dari *speed bump*, dimana l adalah panjang dari *speed bump*, dan v_0 adalah kecepatan mobil. Pada penelitian ini, parameter tersebut

menggunakan asumsi $a = 0.1$ m, $l = 2$ m, dan $v_0 = 30$ km/h (8.333 m/s). (Rajendiran & Lakshmi, 2016)

Kondisi jalan kedua yang digunakan profil jalan acak yang disimulasikan melalui *software* Simulink MATLAB, dengan menggunakan *standard random number generator*, yang kemudian diproses oleh *Zero-order hold (ZOH)* dengan *holding time* 0.1 detik dan dikali dengan *gain* 0.0158. (Rajendiran & Lakshmi, 2016)

2.5 Sistem Kendali

2.5.1 Kendali PID

Kendali PID sering digunakan pada berbagai aplikasi di industri mekatronika karena desain yang sederhana dan mekanisme *feedback* yang paling umum. Efektivitas kendali PID sangat bergantung pada 3 parameter, yaitu Proporsional, Integral, dan Derivatif (Singh, 2018).

2.5.1.1. Kendali Proporsional

Kendali proporsional bersifat seperti *gain* (penguat) tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja pengendali. Penggunaan K_p memiliki berbagai keterbatasan karena sifat kendali yang tidak dinamis tersebut. Walaupun demikian, dalam aplikasi – aplikasi dasar yang sederhana, kendali P cukup mampu untuk memperbaiki respons transien khususnya parameter *rise time* dan *settling time*. Kendali Proporsional ini memiliki *output* yang proporsional dengan besarnya nilai *error*.

2.5.1.2. Kendali Integral

Pengendali integral berfungsi untuk menghasilkan respons sistem yang memiliki *steady state error* = 0. Untuk mencapai *steady state error* 0, sebuah sistem kendali PID harus memiliki pengendali integratif. Kendali integral memiliki *output* yang merupakan hasil penjumlahan secara terus menerus dari perubahan *input*. Jika nilai *error* tidak memiliki perubahan, maka nilai *output* akan tetap. Sinyal *output* dari kendali integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva *error*.

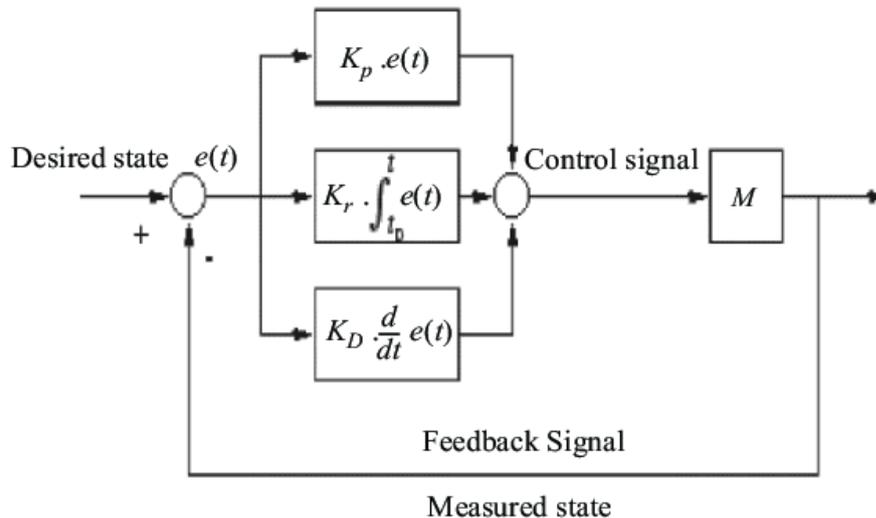
2.5.1.3. Kendali Derivative

Kendali derivatif memiliki sifat yang serupa seperti dengan operasi derivatif pada matematika. Perubahan yang mendadak pada masukan pengendali akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, maka keluaran dari pengendali juga tidak mengalami perubahan, namun apabila sinyal masukan berubah mendadak dan naik (berbentuk fungsi *step*), maka keluaran hasil yang terbentuk adalah sinyal berbentuk impuls. Jika sinyal masukan berbentuk fungsi *ramp*, maka hasil keluarannya adalah fungsi *step* yang besarnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta K_d . Kendali derivatif hanya berubah saat ada perubahan *error* sehingga saat nilai *error* bersifat statis, kendali ini tidak akan bekerja, hal ini pula yang menyebabkan kendali derivatif tidak dapat dipakai sendiri. Berdasarkan karakteristik tersebut, kendali derivatif umumnya digunakan untuk mempercepat respons awal suatu sistem, namun tidak mampu memperkecil/ menghilangkan *steady state error*. Ringkasan Respons parameter kendali PID terhadap perubahannya secara independent dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Respons sistem kendali PID terhadap perubahan parameter (Bansal, 2009)

Parameter	Rise Time	Overshoot	Settling Time	S.S. Error
Kp	Decrease	Increase	Small Change	Decrease
Ki	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
Kd	Small Change	Decrease	Decrease	Small Change

Kendali PID merupakan salah satu kendali paling bagus, namun kendali PID tidak dapat digunakan pada kasus yang lebih kompleks seperti kasus *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) System (Sharkawy et al., 2015). Kendali PID memerlukan penyesuaian parameter (*tuning*) supaya sistem *close-loop* yang dirancang dapat memenuhi kriteria performansi yang diinginkan, hal ini dikarenakan karena parameter – parameter pada kendali PID tidak *independent*. Cara kerja kendali PID adalah dengan membandingkan *output* aktual dan *output* yang diinginkan lalu memperbaiki *error* yang dimiliki dengan menghasilkan sebuah sinyal kendali (U) untuk mengubah *output* aktual menjadi *output* yang diinginkan (Mahmoodabadi & Nejadkourki, 2020). Performa optimal dari kendali PID bergantung pada pemilihan dan penyesuaian nilai *gain* pada kendali tersebut, beberapa metode *tuning* yang sering digunakan adalah metode heuristik, metode Ziegler-Nichols *criterion*, dan metode lainnya (Khodadadi, 2018). *Block Diagram* kendali PID dapat dilihat pada Gambar 2.6

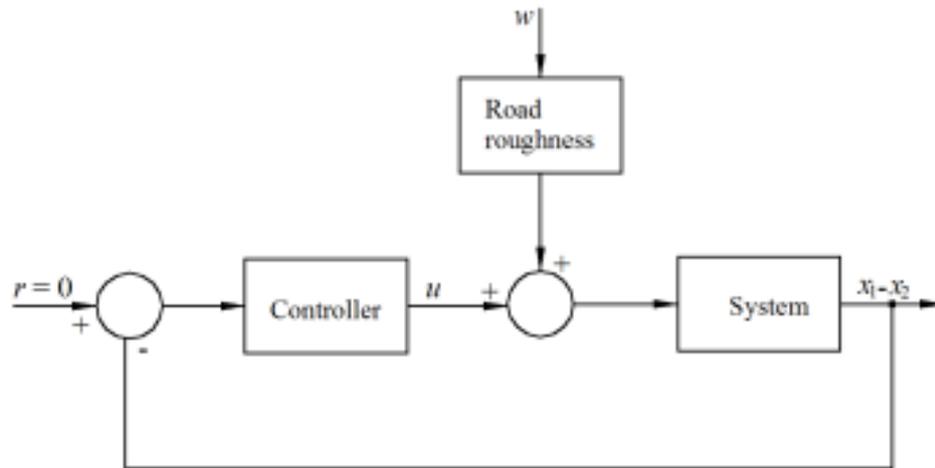


Gambar 2.6 Block diagram PID (Bansal, 2009)

Persamaan umum pada kendali PID adalah:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (11)$$

Di mana $u(t)$ adalah sinyal kendali yang dikirim kepada sistem, $y(t)$ adalah *output* aktual/ sebenarnya, $e(t)$ adalah *error value* dan $r(t)$ adalah *output* yang diinginkan. *Error* dapat diperoleh melalui persamaan $e(t) = r(t) - y(t)$. (Sharkawy et al., 2015)



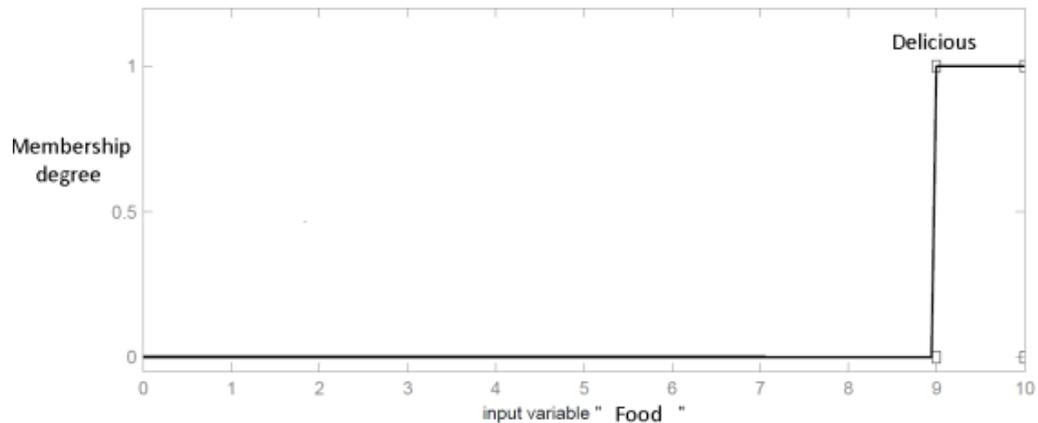
Gambar 2.7 Block Diagram sistem suspensi kendaraan
(Pekgökgöz et al., 2010)

Di mana u dan w adalah *input* ke dalam sistem, dan $x_1 - x_2$ adalah *output*. Sistem kendali diawali dengan nilai awal nol dari $r = 0$ dan nilai yang ditetapkan dari w . Kemudian, diambil selisih nilai masukan sistem yang diperoleh dengan nilai awal pertama sebagai kondisi awal baru. Perhitungan lainnya dilakukan dengan prosedur yang diberikan sebelumnya, dan ketika persyaratan desain telah terpenuhi, maka proses perulangan (*looping*) akan menghentikan perhitungan. (Pekgökgöz et al., 2010) Block Diagram sistem suspensi kendaraan dapat dilihat pada Gambar 2.7

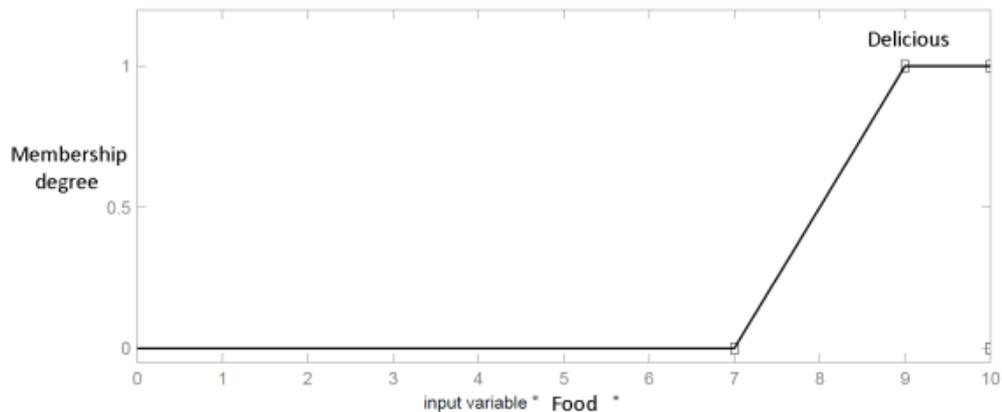
Pada penelitian ini, parameter PID akan diatur/ disesuaikan menggunakan logika fuzzy, kombinasi dari kedua jenis kendali ini disebut juga sebagai kendali Fuzzy – PID, pembahasan mengenai kendali Fuzzy - PID akan dibahas lebih lanjut pada bagian selanjutnya.

2.5.2 Kendali Fuzzy Logic Controller (FLC)

FLC pertama kali dikembangkan oleh L. A. Zadeh pada tahun 1965 sebagai alternatif dari berbagai permasalahan pada aplikasi sistem kendali. Sistem Logika *fuzzy* mampu mengubah *input* yang tidak tepat menjadi *input* yang tepat dengan menggunakan metodologi intuitif (Gandhi et al., 2017). Pada penelitian ini, FLC digunakan sebagai kendali untuk penolakan gangguan sehingga mampu mengurangi gerakan kendaraan yang tidak diinginkan. Logika *fuzzy* dipilih sebagai kendali pada sistem suspensi aktif karena logika *fuzzy* mampu meniru dan mengaplikasikan penalaran pola pikir manusia secara prakiraan daripada secara eksak, hal ini berbeda dengan komputasi secara umumnya yang memerlukan masukan yang akurat, presisi dan pasti. Dengan Logika fuzzy kita dapat menentukan aturan pemetaan dalam bentuk kata-kata daripada angka, hal tersebut memungkinkan kita untuk dapat mengeksplorasi ketidaktepatan dan toleransi. Selain itu logika *fuzzy* juga mampu memproses logika penalaran kompleks yang sangat berguna dalam memperhitungkan sesuatu yang tidak akurat dan tidak pasti, kemampuan tersebut memungkinkan logika *fuzzy* untuk beroperasi pada sistem dengan tingkat kompleksitas yang sangat tinggi, sistem yang tidak konstan/ fluktuatif, dan sistem yang tidak memiliki persamaan matematis yang tepat, kondisi tersebut sesuai dengan kondisi operasi sistem suspensi aktif permukaan jalan yang tidak terprediksi (Dernoncourt, 2013; Kothandaraman & Lakshmi, 2010). Perbedaan sistem komputasi pada umumnya dengan sistem komputasi fuzzy dapat dilihat pada perbandingan Gambar 2.8 dan 2.9



Gambar 2.8 Sistem komputasi pada umumnya (Dernoncourt, 2013)



Gambar 2.9 Sistem Komputasi Fuzzy (Dernoncourt, 2013)

Salah satu poin utama dalam *fuzzy controller* adalah dalam menentukan *rule/* peraturan pada kendali, kemampuan kendali pada FLC akan terbatas kepada pengetahuan serta pengalaman dari orang yang merancang dan mengimplementasikannya (Moghadam-Fard & Samadi, 2015). Hal tersebut juga merupakan kekurangan utama daripada kendali Fuzzy, karena dalam setiap perancangan kendali fuzzy, akan diperlukan tenaga ahli yang membantu dalam proses mendesain *rule* tersebut, *rule* yang didesain juga akan di optimasi dengan metode *trial and error* untuk memperoleh *rule* yang optimal yang hanya dapat digunakan pada kondisi tersebut.

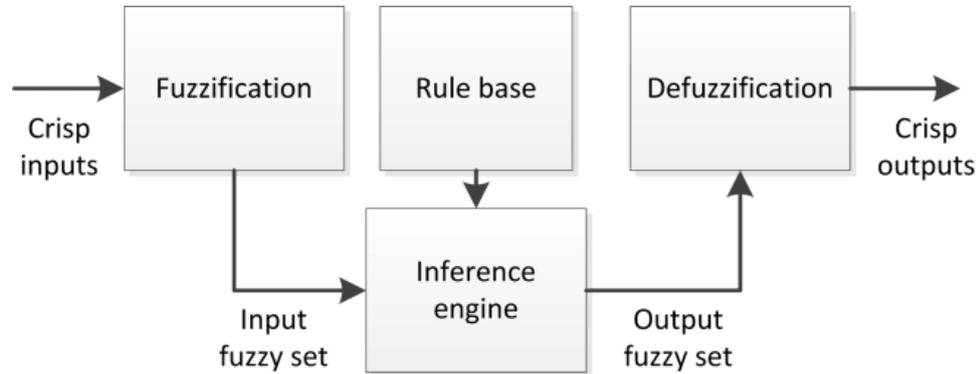
Dalam menafsirkan kualitas yang tidak tepat tersebut, logika *Fuzzy* melakukan 3 tahapan penalaran, yaitu :

- *Fuzzification Interface*, berfungsi mengubah/ mengonversi *input* dari sensor yang masih berupa nilai real menjadi data *fuzzy*
- MF, merupakan *function* yang digunakan untuk menentukan pengelompokan data *input* yang bersifat *fuzzy* dalam kategori – kategori yang telah ditentukan,

MF digunakan pada proses mengonversi data *input* menjadi data *fuzzy* dan sebaliknya

- *Defuzzification Interface*, berfungsi untuk mengubah/ mengonversi *output* yang masih bersifat *fuzzy* menjadi *output* aktual dengan nilai real (Dernoncourt, 2013; Kothandaraman & Lakshmi, 2010)

Block Diagram Tahapan penalaran tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Block diagram FLC
(Panduru et al., 2014)

Crisp set dan *Fuzzy set* adalah terminologi pada FLC, *Crisp set* memiliki arti sebagai informasi yang jelas dan mengandung nilai asli/ real, sedangkan *Fuzzy* dapat di definisikan sebagai informasi yang tidak jelas yang belum mengandung nilai asli/ real. (Gandhi et al., 2017)

Dalam proses aplikasi MF pada tahap defuzzifikasi/ *defuzzifier*, beberapa operator digunakan untuk membantu proses pembuatan keputusan, operator tersebut adalah operator *complement* (NOT), *intersection* (AND), dan *union* (OR). Logika penalaran/ *Rule* pada *fuzzy* berbentuk argumen variabel linguistik yang tersusun dari pernyataan bersyarat untuk klausul jika dan maka (*If – Then Clause*). Logika penalaran ini digunakan dengan konsep dasar bahwa semakin banyak proposisi yang terpenuhi pada premis yang telah disusun, maka semakin wajib tindakan yang disarankan untuk diterapkan/ dilaksanakan. Seperti yang telah kita definisikan dengan operator fuzzy AND, OR, dan NOT, premis dari aturan fuzzy dapat dibentuk melalui kombinasi dari proposisi fuzzy, seluruh peraturan/ *rule* dari sebuah sistem fuzzy disebut sebagai *decision matrix* (Dernoncourt, 2013; Kothandaraman & Lakshmi, 2010). Susunan logika operasi yang digunakan pada kendali fuzzy dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan contoh penggunaannya dapat dilihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.3 Logika operasi kendali Fuzzy

(<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html>)

AND			OR			NOT	
A	B	$A \cup B$	A	B	$A \cup B$	A	\bar{A}
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

Tabel 2.4 Contoh *decision matrix* pada sistem pelayanan di rumah makan (Dernoncourt, 2013)

IF pelayanan mengecewakan OR makanan tidak enak	THEN tip sedikit
IF pelayanan bagus	THEN tip sedang
IF pelayanan memuaskan OR makanan enak	THEN tip banyak

FLC memiliki 2 tipe yaitu tipe Sugeno dan tipe Mamdani. Tipe Mamdani telah diterima secara luas dalam kemampuannya untuk dapat menangkap pengetahuan dari para ahli, hal ini memungkinkan tipe Mamdani untuk dapat lebih intuitif sehingga memiliki kemiripan yang lebih dekat pada pola pikir manusia. Namun pada proses aplikasinya, tipe Mamdani memberikan beban komputasi yang lebih besar dibandingkan dengan tipe Sugeno. Selain memiliki efisiensi komputasi yang lebih besar, tipe Sugeno juga dapat bekerja dengan baik dengan pengoptimalan dan teknik adaptif yang menjadi salah satu daya tarik utama di metode Sugeno, terutama pada permasalahan sistem non-linear yang dinamis. Pada permasalahan tersebut, metode adaptif dapat digunakan untuk menyesuaikan MF sehingga sistem fuzzy dapat memodelkan permasalahan tersebut dengan lebih baik. (Kaur & Kaur, 2012)

Perbedaan mendasar pada tipe Sugeno dan Mamdani terdapat pada cara *output* dihasilkan. Pada Mamdani *output* dihasilkan dengan menggunakan metode *defuzzification* dari fuzzy menjadi *crisp output*, sedangkan tipe Sugeno menggunakan pembebanan rata – rata (*weighted average*) untuk melakukan komputasi pada *output*. Hal tersebut membuat tipe Sugeno tidak memiliki kemampuan interpretasi dan ekspresif karena peraturan yang tidak *fuzzy*. Di sisi lain, hal tersebut memberikan waktu proses yang lebih baik pada metode Sugeno karena proses *defuzzification* yang memakan waktu lama diganti dengan metode pembebanan rata – rata (*weighted average*). Perbedaan lainnya terdapat pada *output* MF, di mana tipe Mamdani memberikan *output* MF namun tipe Sugeno tidak memberikannya. (Kaur & Kaur, 2012)

Data yang digunakan sebagai parameter *input* pada FLC adalah *error* dan derivatif *error* dari percepatan kepala pengemudi mobil sedangkan *output* yang dihasilkan adalah gaya aktuator f_d . Seluruh parameter *input* dan *output* yang digunakan akan dinormalisasi pada rentang nilai [-1 1]. (Kothandaraman & Lakshmi, 2010)

FLC dapat diakses melalui *Fuzzy Logic Toolbox* (FLT) pada *software* MATLAB, FLT memiliki 5 jenis GUI untuk merancang *Fuzzy Inference System* (FIS):

1. FIS Editor, pada FIS editor, *user* dapat menambah parameter *input* maupun *output* yang digunakan
2. MF Editor, dapat digunakan untuk mengedit MF yang digunakan seperti tipe, *range*, dan *display range*, serta nilai *params*
3. Rule Editor, digunakan untuk memberi *Rule* yang akan digunakan pada *MF*, rule ditentukan dan di-generate oleh user.
4. Rule Viewer, digunakan untuk melihat kinerja *rule*, dengan *Graphical User Interface* (GUI) yang terdapat kolom khusus untuk memberikan nilai *input*

5. Surface Viewer, digunakan untuk melihat *rule* yang sudah di *input*, baik yang bersifat SISO, SIMO, MISO, maupun MIMO.

2.5.2.1. Membership Function

Membership function (MF) adalah sebuah kurva yang menunjukkan/ mendefinisikan bagaimana setiap nilai dari ruang *input* dipetakan ke dalam nilai keanggotaan yang memiliki interval nilai di antara 0 sampai 1 (Kothandaraman & Lakshmi, 2010). Sebuah MF pada *fuzzy set* umumnya dilambangkan dengan μ_A . Jika x adalah elemen dari A , maka nilai $\mu_A(x)$ disebut sebagai derajat keanggotaan (*Membership Degree*) dari x pada himpunan *fuzzy/ fuzzy set*.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in A\} \quad (12)$$

Derajat keanggotaan (*Membership Degree*) $\mu_A(x)$ menguantifikasi nilai dari keanggotaan elemen x kepada himpunan *fuzzy/ fuzzy set* A . Nilai $\mu_A(x) = \text{Satu}$ (1) berarti elemen x merupakan anggota dalam himpunan *fuzzy/ fuzzy set*. Sedangkan Nilai $\mu_A(x) = \text{Nol}$ (0) berarti bahwa elemen x bukan merupakan anggota dalam himpunan *fuzzy/ fuzzy set*. Variabel linguistik x pada himpunan U ditulis dengan

$$T(x) = \{T_x^1, T_x^2, T_x^3, \dots, T_x^k\} \quad (13)$$

$$\mu(x) = \{\mu_x^1, \mu_x^2, \mu_x^3, \dots, \mu_x^k\} \quad (14)$$

Di mana $T(x)$ adalah ketentuan dari variabel x , dan T_x^i merupakan anggota fuzzy dengan MF μ_x^i pada himpunan U . sebagai contoh, jika x merupakan variabel tinggi, maka $T(x)$ merupakan set seperti pendek, sedang, atau tinggi.

Pada aplikasi fuzzy, terdapat berbagai jenis MF yang digunakan, selain MF dengan bentuk trapezoidal, terdapat juga bentuk segitiga, lonceng, kurva gaussian, kurva polynomial, dan fungsi sigmoid. Seluruh MF tersebut mengikuti sebuah persamaan matematis yang berbeda tergantung pada bentuk yang digunakan. Salah satu MF yang akan digunakan adalah MF jenis *triangular* (trimf), dan berikut merupakan persamaan matematis yang digunakan pada MF *triangular*.

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{for } b \leq x < c \\ 0, & \text{for } x > c \end{cases} \quad (15)$$

Pada penelitian ini, MF yang digunakan berasal dari sumber referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016). FLC yang digunakan terdiri dari 2 *input* yaitu *error* dan bentuk derivatif nya sebagai *input* ke dua, tiap *input* memiliki 7 MF, dan sebuah *output* dengan 13 MF, seluruh FLC menggunakan bentuk *triangular*, dan detail *rule* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.5

Tabel 2.5 *fuzzy logic rule* pada kendali sistem suspensi aktif (Rajendiran & Lakshmi, 2016)

Error	Derivative Error						
	PL	PB	PS	Zero	NS	NB	NL
NL	Z	P1	P2	P3	P4	P5	P6
NB	N1	Z	P1	P2	P3	P4	P5
NS	N2	N1	Z	P1	P2	P3	P4
Zero	N3	N2	N1	Z	P1	P2	P3
PS	N4	N3	N2	N1	Z	P1	P2
PB	N5	N4	N3	N2	N1	Z	P1
PL	N6	N5	N4	N3	N2	N1	Z

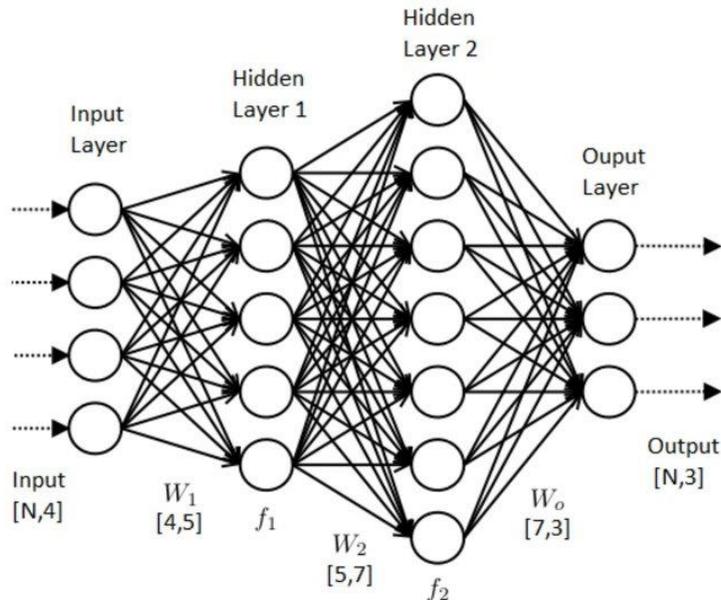
Dimana N merupakan Negatif, P, merupakan Positif, L merupakan *Large*, B merupakan *Big*, dan S merupakan *Small*, Z merupakan *Zero*, dan P6 memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan P1, serta N6 memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan N1

2.5.3 Jaringan Saraf Tiruan (Artificial Neural Network)

Jaringan saraf tiruan (*artificial neural network*) pertama kali ditemukan oleh Mc. Culloch dan Pitts, merupakan salah satu sistem pemrosesan informasi yang didesain dengan menirukan cara kerja otak manusia dalam menyelesaikan suatu masalah dengan melakukan proses belajar melalui perubahan bobot sinapsisnya (Alfiati, 2017). Sebagai sistem yang mampu menirukan perilaku manusia, umumnya sistem mempunyai ciri khas yang mampu menirukan kemampuan dalam hal:

1. Menyimpan informasi
2. Menggunakan informasi yang dimiliki untuk melakukan pekerjaan dan menarik kesimpulan
3. Beradaptasi dengan keadaan baru
4. Berkomunikasi dengan penggunanya.

Keunggulan utama dari sistem jaringan saraf tiruan adalah kemampuannya untuk belajar dari contoh data yang diberikan, data tersebut dinamakan *training data*, sedangkan kelemahan utamanya adalah proses pelatihan dalam pengoperasiannya dan waktu yang diperlukan dalam pemrosesannya (Alfiati, 2017). Secara umum, jaringan saraf tiruan dapat digambarkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11 lapisan pada jaringan saraf tiruan (Araujo et al., 2019)

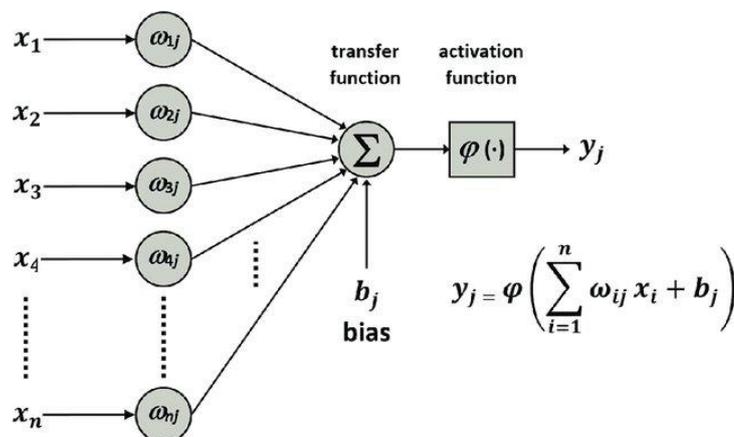
Berdasarkan gambar tersebut, jaringan saraf tiruan tersusun atas 3 lapisan, yaitu:

1. Lapisan *input* (*input layer*); berfungsi sebagai penghubung jaringan ke sumber data awal.
2. Lapisan tersembunyi (*hidden layer*); lapisan yang berada diantara lapisan *input* dan *output*, dimana neuron yang dibuat akan mengambil satu set *input* dan menghasilkan *output* melalui fungsi aktivasi.
3. Lapisan *output* (*output layer*); lapisan ini berfungsi untuk menghasilkan hasil akhir.

Secara umum terdapat tiga jenis *neural network* yang sering digunakan berdasarkan jenis *network*-nya, yaitu:

1. *Single Layer Neural Network*

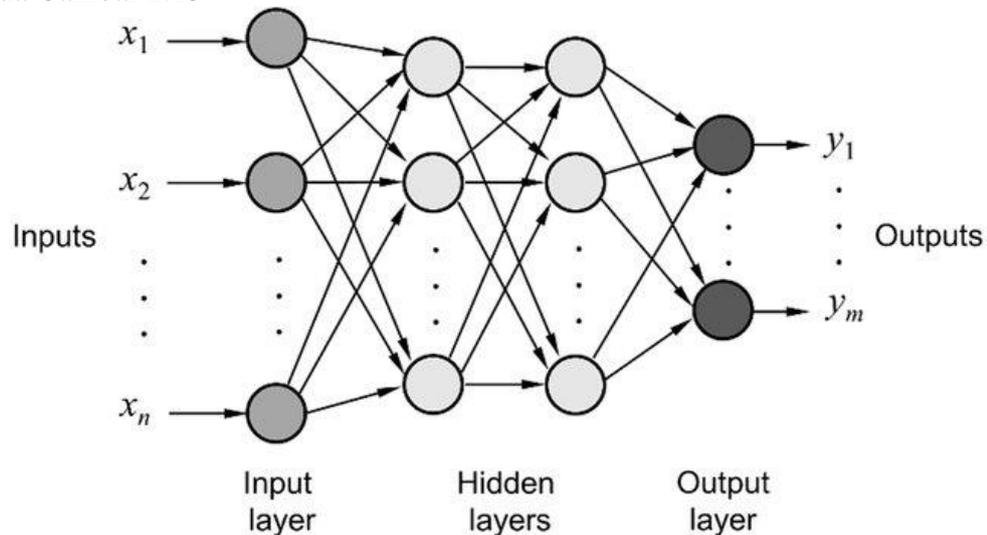
Single layer neural network adalah jaringan dimana neuron *input* langsung dihubungkan dengan neuron *output*, dengan kata lain *single layer neural network* tidak memiliki *hidden layer* di antara *input* dan *output*-nya. Gambar *single layer neural network* dapat dilihat pada Gambar 2.12



Gambar 2.12 *Single Layer Neural Network* (Alvarez et al., 2017)

1. Multilayer Neural Network

Multilayer neural network adalah jaringan saraf tiruan yang mempunyai lapisan/ *layer* diantara lapisan *input* dan *output* yang dinamakan *hidden layer*. Pada aplikasinya bisa terdapat lebih dari satu *hidden layer* pada sebuah *multilayer perceptron neural network*. Gambar *multilayer neural network* dapat dilihat pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 *Multilayer Neural Network*
(Pouliakis et al., 2016)

2. Jaringan Reccurent

Model jaringan *reccurent* mirip dengan jaringan *layer* tunggal maupun ganda, hanya saja terdapat neuron *output* yang memberikan sinyal kepada neuron *input* sehingga proses keseluruhannya menjadi sistem tertutup (*closed system*), sistem ini sering juga disebut sebagai *feedback loop*. (Wuryandari & Afrianto, 2013)

2.5.3.1. Pre-Processing Data

Pre-processing data merupakan seluruh proses yang dilakukan sebelum data awal tersebut diproses atau dianalisis. Tujuan dari data analisis data adalah untuk mengetahui informasi berharga yang terdapat pada data tersebut dan menyajikan data tersebut dengan cara yang berarti, dan untuk mendukung tujuan tersebut, *data pre-processing* perlu dilakukan, terutama pada kasus – kasus berikut:

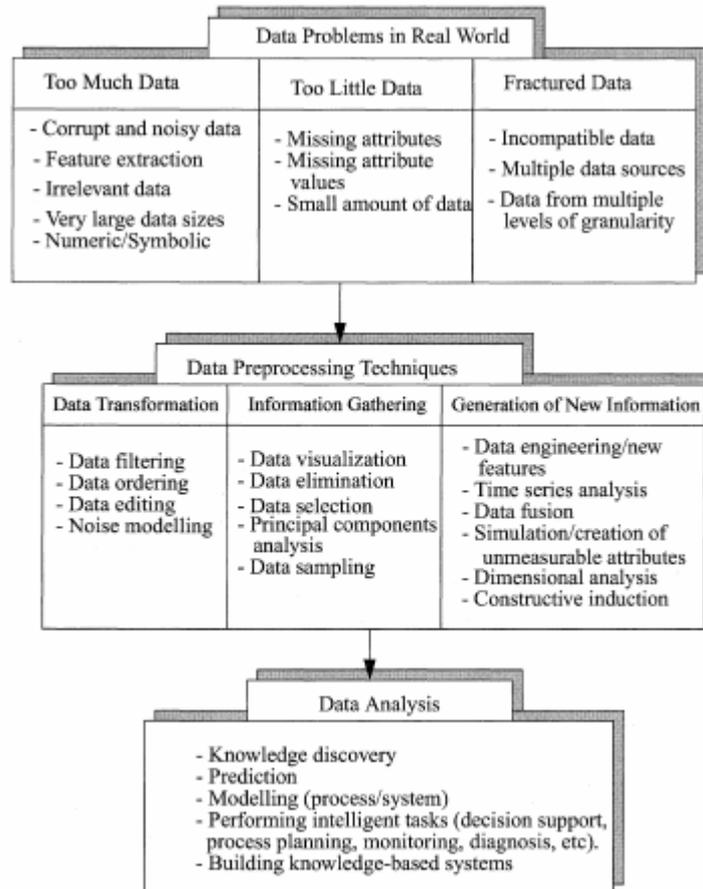
- Menyelesaikan permasalahan pada data awal yang menghambat kita untuk melakukan metode analisis,
- Untuk memahami sifat data dan melakukan analisis data yang lebih bermakna, dan
- Untuk mengekstraksi informasi yang lebih bermakna dari kumpulan data tertentu

Pada sebagian besar aplikasi, ada kebutuhan untuk memerlukan lebih dari satu bentuk *pre-processing*. Maka dari itu, Proses identifikasi jenis *pre-processing* data merupakan tugas yang penting (Famili et al., 1997)

Data real yang diperoleh dari dunia nyata akan selalu ada permasalahan, sifat dan tingkat dari masalah tersebut bergantung pada banyak alasan dan terkadang berada diluar kendali manusia. Secara garis besar permasalahan tersebut dapat

dibagi menjadi 3 yaitu: terlalu banyak data, terlalu sedikit data, dan data yang retak (*fractured data*). Penjelasan singkat mengenai tiap permasalahan pada data dapat dilihat pada Gambar 2.14.

- a) Permasalahan data yang terlalu banyak meliputi: *data corrupt*, *data noise*; *data irrelevant*; dan data yang terlalu besar yang tidak mampu diproses oleh teknologi yang ada
- b) Permasalahan data yang terlalu sedikit meliputi: kurangnya variabel yang perlu diperhatikan, kurangnya nilai pada variabel yang perlu diperhatikan, dan data yang terlalu sedikit
- c) *Fractured data* meliputi: data yang tidak kompatibel, data yang memiliki beberapa sumber. (Famili et al., 1997)
- d)



Gambar 2.14 Permasalahan pada data dan metode *pre-processing* data (Famili et al., 1997)

Pada penelitian ini, metode *pre-processing* data yang akan dibahas lebih lanjut adalah proses normalisasi. Normalisasi merupakan sebuah metode pemetaan, dimana kita mampu mencari rentang baru dari rentang data yang sudah ada. Proses normalisasi juga memastikan bahwa data dengan rentang yang berbeda, akan memiliki bobot yang sama pada saat di proses nantinya, karena jika data tersebut tidak memiliki rentang yang sama, maka data dengan rentang yang lebih besar, akan memiliki dampak yang lebih signifikan daripada data dengan rentang yang kecil. Salah satu metode normalisasi yang paling umum dilakukan adalah metode “Min-Max”, dimana data dengan rentang yang berbeda akan di petakan pada sebuah

rentang “Min” sampai dengan “Max” yang sama, metode ini dapat dilaksanakan dengan persamaan matematis berikut:

$$x' = (b - a) \left(\frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \right) + a \quad (16)$$

Dimana x' merupakan data hasil yang telah di normalisasi, batas “Min” dan “Max” pada data adalah $[a,b]$ dan x merupakan data yang akan dinormalisasi (Patro & Sahu, 2015)

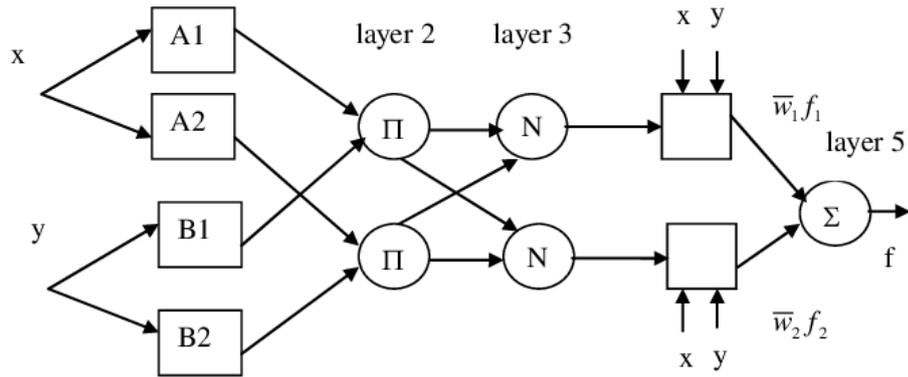
2.5.4 Kendali ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

Sistem Neuro-fuzzy diperkenalkan pada tesis Jyh-Shing Roger Jang pada tahun 1992 dengan nama “ANFIS Adaptive-*Network*-based Fuzzy Inference System” (Jang, 1993). Penelitian tersebut menggunakan *neural network* untuk mengekspresikan struktur dari sistem *fuzzy* dalam bentuk *multilayer perceptron*. Secara sederhana, *multilayer perceptron* (MLP) adalah *neural network* tanpa siklus (*cycle*). Lapisan *input* (*input layer*) yang diberikan *vector network* dan *network* akan mengembalikan hasil vektor pada lapisan *output* (*output layer*). Di antara kedua jaringan ini, elemen dari *vector input* akan diukur oleh bobot dari tiap jaringan dan dicampur dengan *hidden neuron* di *hidden layer*. (Dernoncourt, 2013)

Controller ANFIS merupakan metode gabungan dari FLC yang memiliki efektivitas tinggi pada proses komputasi dan *machine learning/ Neural Network* (NN) yang memiliki kemampuan tinggi pada komputasi data matematis. Gabungan dari kedua struktur ini meningkatkan kapabilitas Controller ANFIS, dengan adanya *self-tuning* dan MF yang bersifat adaptif untuk mencari hasil optimal pada data *input* dan *output* (Singh, 2018). Dengan demikian, sistem ANFIS menggunakan NN untuk melatih dan menghasilkan *fuzzy inference system* yang terbaik.

Pada penelitian ini, proses pemetaan *input* dan *output* dilakukan dengan memperbaharui parameter yang berhubungan dengan MF berdasarkan data *input* dan metodologi pembelajaran *hybrid* yang menggabungkan *gradient descent* dan *recursive least square estimator* (RLSE). Pada proses *forward propagation*, RLSE dihitung untuk memperoleh parameter pada layer 4, dan *error* akan dihasilkan dengan membandingkan *output* aktual dengan *output* yang diinginkan, lalu akan di *back propagation* pada layer 1 kembali. Metode pembelajaran ini menghasilkan laju konvergensi pembelajaran yang lebih cepat dengan mengurangi ruang pencarian (*dimensional search space*) pada proses *back propagation*. Setiap pengulangan dari pembelajaran ini disebut sebuah *epoch*. (Gandhi et al., 2017; Jang, 1993; Senthil Kumar et al., 2018). Model ANFIS yang digunakan berasal dari *toolbox* MATLAB “Neuro-Fuzzy Designer”

Struktur ANFIS tersusun dari 5 lapisan/ layer yang memiliki fungsi masing – masing, bentuk lingkaran menandai saraf yang bersifat permanen dan bentuk kotak menandai saraf yang akan mengalami perubahan parameter secara terus menerus pada saat proses pelatihan/ adaptasi data *input*. (Gandhi et al., 2017; Singh, 2017) Gambar 2.15 merupakan Arsitektur ANFIS yang memberikan ilustrasi mengenai 5 layer dengan fungsi berbeda.



Gambar 2.15 Arsitektur ANFIS
(C.K. & Kannan, 2006)

Fungsi pada tiap layer pada ANFIS:

- Layer 1 berfungsi untuk menerima *input* dan melakukan proses fuzzifikasi melalui aplikasi MF pada tiap *input* dan akan memperbaharui nilainya sendiri. Seluruh *output* pada *node* di layer 1 merupakan *membership value* dengan *input* diberikan oleh MF. *Input* pada layer 1 merupakan *error*. (Gandhi et al., 2017; Jang, 1993; Senthil Kumar et al., 2018; Singh, 2017)

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (17)$$

Dimana O_i^1 merupakan MF dari A_i dan berfungsi untuk menentukan nilai keanggotaan x pada A . Umumnya nilai $\mu_{A_i}(x)$ yang dipilih adalah MF dengan bentuk lonceng dengan nilai maksimum 1 dan nilai minimum 0, untuk kondisi tersebut, persamaannya dapat ditulis sebagai:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + [(\frac{x - c_i}{a_i})^2]b_i} \quad (18)$$

Atau,

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left\{ - \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right\} \quad (19)$$

Dimana $\{a_i, b_i, c_i\}$ merupakan parameter yang telah ditentukan. Bila nilai dari parameter tersebut berubah, maka fungsi MF dengan bentuk lonceng tersebut akan ikut berubah menyesuaikan perubahan parameter tersebut. Parameter pada layer ini disebut juga sebagai *premise parameters*. (Jang, 1993)

- Layer 2 berfungsi untuk mengidentifikasi bobot (*weight*) pada tiap *rule* dengan menggunakan operator perkalian. Hasil dari layer 2 diperoleh melalui perkalian antara sinyal *input* dan sinyal yang dikirim pada *node* selanjutnya. (Gandhi et al., 2017; Jang, 1993; Senthil Kumar et al., 2018)

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1,2. \quad (20)$$

- Layer 3 merupakan *normalization* layer yang bernama *normalized firing strengths*, di mana bobot (*weight*) dari tiap *rule* dibandingkan dengan bobot (*weight*) rule secara keseluruhan, proses ini menciptakan bobot (*weight*) yang ternormalisasi pada keseluruhan *rule* menggunakan persamaan matematis

berikut. (Gandhi et al., 2017; Jang, 1993; Senthil Kumar et al., 2018; Singh, 2017)

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (21)$$

- Layer 4 dikenal juga sebagai layer defuzzifikasi, tiap node pada layer ini merupakan node adaptif dan terhubung dengan *normalization node* pada layer 3. Tiap node pada layer 4 juga menerima *input* yang sama dengan layer 1. Parameter hasil pada layer 4 ini dikenal juga sebagai *consequent parameter* yang terdiri dari $\{p_i, q_i, r_i\}$. (Gandhi et al., 2017; Jang, 1993; Senthil Kumar et al., 2018; Singh, 2017)

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i x + r_i) \quad (22)$$

Dimana \bar{w}_i merupakan *output* dari layer 3, dan $\{p_i x + q_i x + r_i\}$ merupakan parameter yang telah ditentukan, parameter tersebut sering disebut juga sebagai *consequent parameters*.

- Layer 5 merupakan node tunggal tetap yang berfungsi untuk menyimpulkan seluruh sinyal masukan dari layer 4 dan menghasilkan *output* secara keseluruhan dari kendali ANFIS. (Gandhi et al., 2017; Jang, 1993; Senthil Kumar et al., 2018; Singh, 2017)

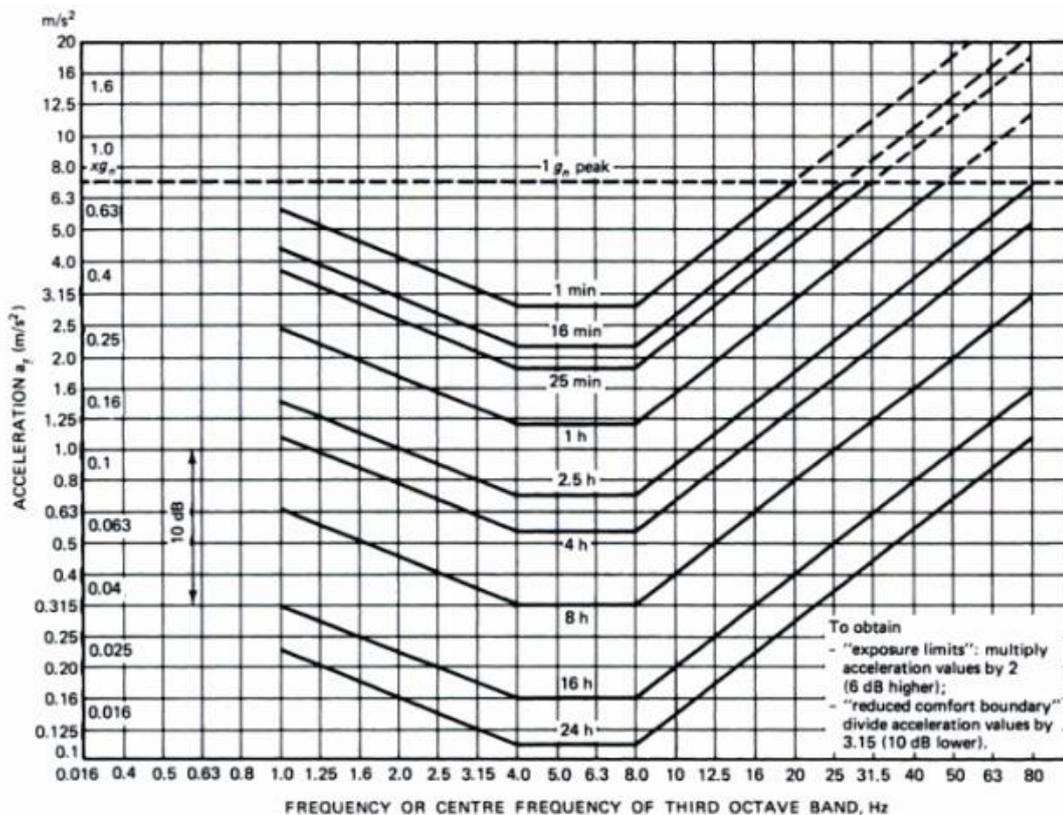
$$O_i^5 = \text{overall output} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (23)$$

2.6 Standar Kenyamanan ISO 2631

Standar kenyamanan merupakan sesuatu yang sulit untuk ditentukan/ diprediksi karena ketidaknyamanan merupakan sesuatu yang subjektif, respons manusia terhadap getaran sangat bervariasi (Griffin, 2007), (Mansfield & Whiting-Lewis, 2004). Ketidaknyamanan mungkin akan bias bagi operator alat yang terbiasa bekerja di lingkungan tertentu untuk waktu yang lama, operator tersebut mungkin sudah menyesuaikan diri dengan tingkat getaran yang tinggi sehingga persepsi mereka menjadi tidak peka terhadap getaran. Mempertimbangkan hal tersebut, mungkin saja pekerja yang kurang sensitif terhadap getaran yang dirasakan akan bertahan di industri dan mereka yang lebih sensitif terhadap getaran akan memilih pekerjaan yang lain. Selain itu, riwayat penyakit/ kecelakaan akan membuat toleransi tiap individu semakin bervariasi satu dengan yang lainnya (Grenier et al., 2010). Sehingga standar kenyamanan ISO 2631 merupakan standar yang menjelaskan batas aman bagi seorang individu yang terpapar oleh getaran dengan frekuensi dan amplitudo tertentu tanpa menyebabkan dampak kesehatan yang signifikan. (Plewa et al., 2012). ISO 2631 menilai kenyamanan pengendara berdasarkan 2 faktor, nilai RMS dari percepatan objek untuk menilai rata – rata getaran yang terjadi secara umum, dan frekuensi serta amplitudo getaran untuk menilai lama batas waktu paparan yang diperbolehkan sehingga tidak memunculkan dampak yang signifikan bagi kesehatan. Klasifikasi reaksi kenyamanan berkendara dapat dilihat pada tabel 2.6, dan klasifikasi lama paparan yang diperbolehkan dapat dilihat pada gambar 2.16

Tabel 2.6 Reaksi Kenyamanan Pengendara – ISO 2631
(Sekulić et al., 2013)

Kategori No.	RMS Getaran (m/s^2)	Keterangan Kenyamanan
1	> 0.315	Tidak ada keluhan
2	$0.315 - 0.63$	Sedikit tidak nyaman
3	$0.5 - 1$	Cukup tidak nyaman
4	$0.8 - 1.6$	Tidak nyaman
5	$1.25 - 2.5$	Sangat tidak nyaman
6	> 2	Amat sangat tidak nyaman



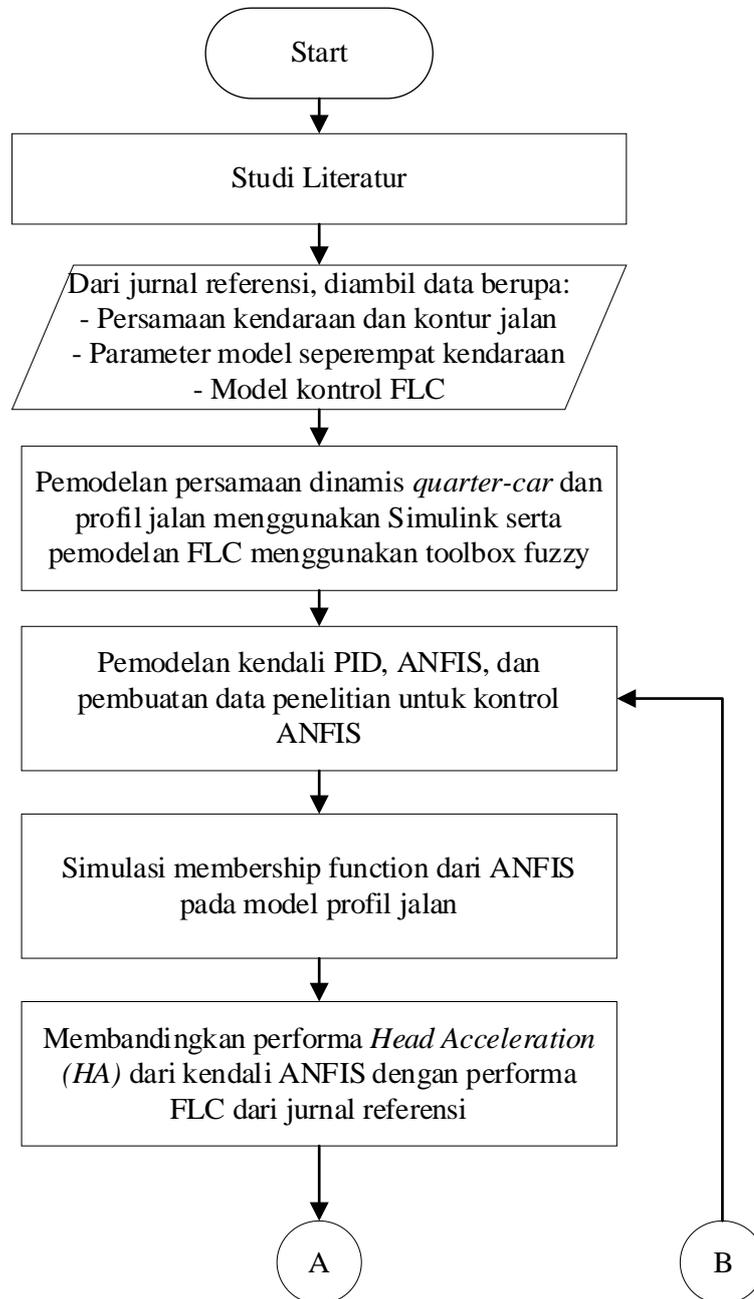
Gambar 2.16 Grafik kenyamanan ISO 2631
(Danko et al., 2017)

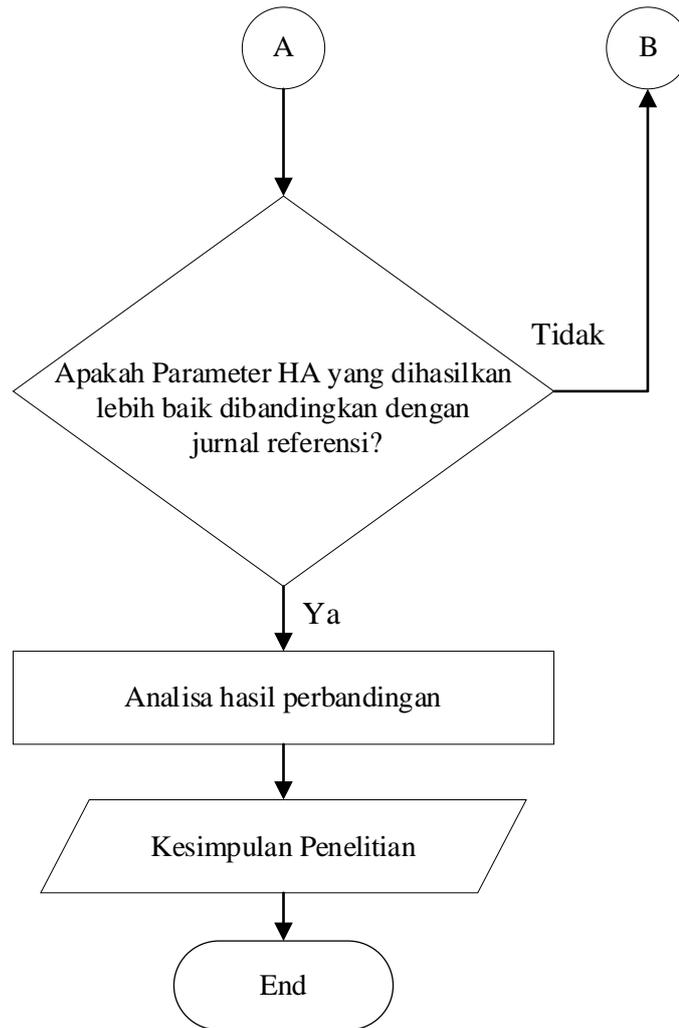
Grafik kenyamanan ISO 2631 dibaca dengan melihat garis yang memiliki keterangan jam sebagai acuan, grafik respons HA terhadap frekuensi nantinya akan dibandingkan dengan grafik ISO diatas, dan akan dilihat *trendline* dari respons masing – masing sistem kendali terhadap grafik tersebut. Apabila *trendline* dari respons sistem kendali memiliki nilai yang tidak melewati garis 8 jam namun melewati garis 16 jam dan 24 jam, maka sistem kendali tersebut akan nyaman apabila getaran yang dirasakan tidak lebih dari 8 jam.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir dari penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini:





Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

3.1.1 Studi Literatur

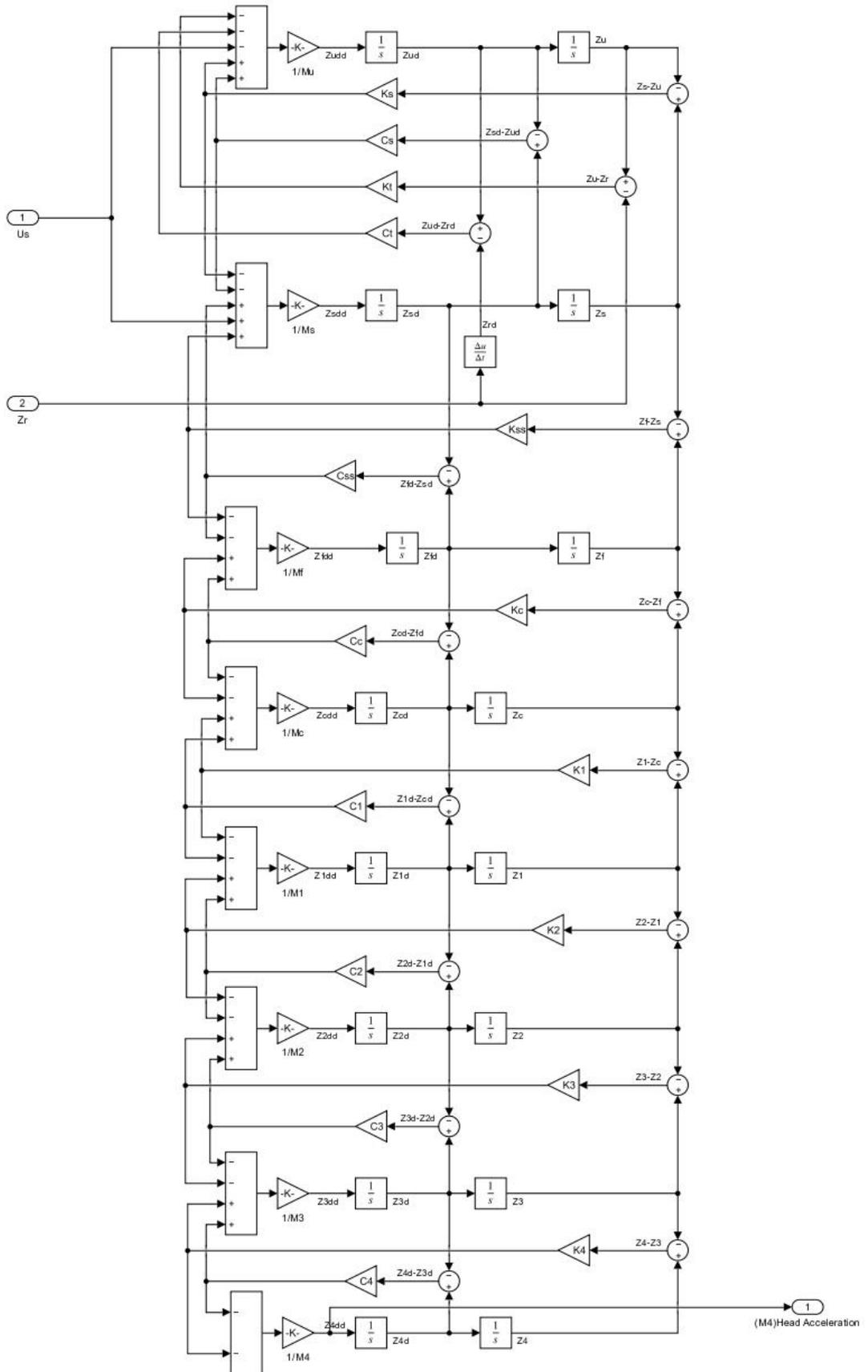
Studi Literatur bertujuan untuk mendalami landasan teori yang akan digunakan pada penelitian ini. Penelitian yang dilakukan memiliki banyak keterbatasan karena penelitian ini dilaksanakan pada saat pandemi berlangsung sehingga penelitian ini dirancang hanya sampai pada tahap simulasi dan belum sampai pada tahap validasi secara eksperimental. Selain itu, terdapat juga keterbatasan dalam ketersediaan peralatan yang diperlukan untuk melakukan uji validasi hasil simulasi ini. Karena penelitian ini terbatas pada tahap simulasi, maka faktor – faktor perancangan yang sebenarnya, seperti jenis aktuator yang akan digunakan tidak ditentukan. Penelitian ini berfokus pada sistem kendali yang digunakan pada sistem suspensi aktif. Sehingga Studi literatur yang dilakukan adalah dengan mencari jurnal – jurnal referensi yang meneliti topik sejenis dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu topik yang meneliti sistem suspensi aktif, kendali ANFIS, kendali PID dan kendali Fuzzy.

3.1.2 Pemodelan Kendaraan dan Profil Jalan

Model kendaraan yang digunakan pada penelitian ini adalah model seperempat kendaraan/ *quarter – car*, pemilihan model kendaraan tersebut didasari oleh kesederhanaan sehingga dapat mempermudah proses analisis karakteristik dari sistem

suspensi., namun walaupun model yang sederhana, *quarter - car model* mengandung banyak karakteristik penting yang digunakan pada model kendaraan utuh, Pada model *quarter – car*, sifat kekakuan pada roda disederhanakan menjadi spring tanpa mempertimbangkan karakteristik sebenarnya dari roda.

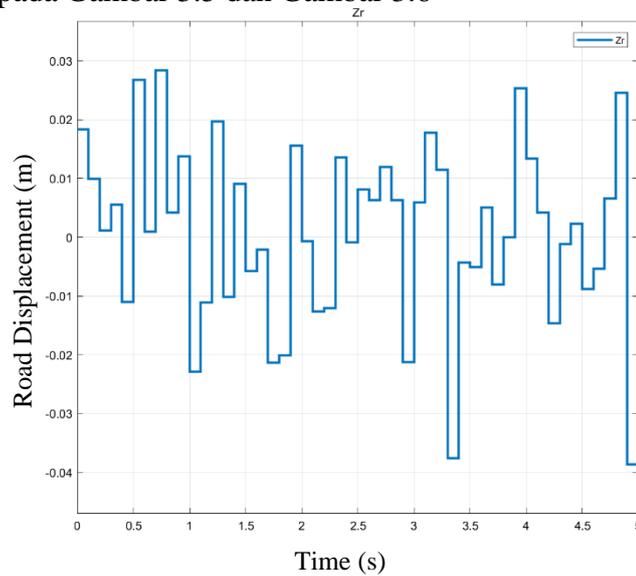
Detail mengenai model *quarter – car* berupa persamaan serta parameter yang digunakan sudah dijelaskan sebelumnya pada Bab 2.3 Pemodelan Persamaan Kendaraan. Rangkaian Simulink yang telah dibuat untuk menyimulasikan persamaan *quarter-car model* (1) – (8) dapat dilihat pada Gambar 3.2



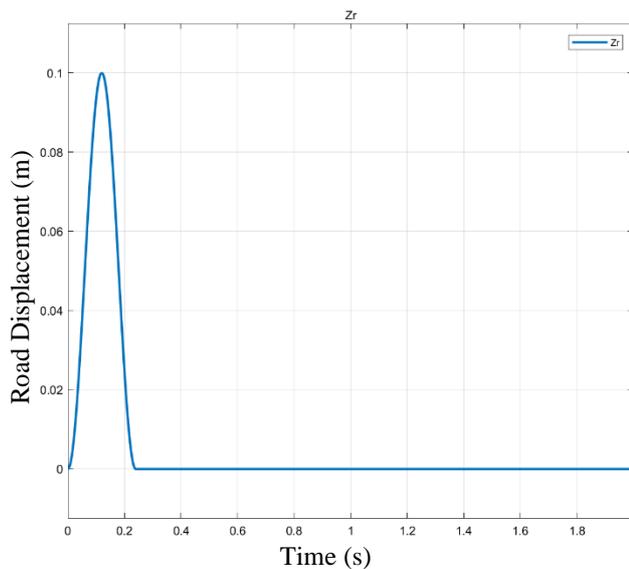
Gambar 3.2 Rangkaian Simulink untuk *quarter-car model* berdasarkan referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016)

Rangkaian tersebut diciptakan melalui persamaan (1) – (8). Mula – mula, kita memindahkan nilai massa pada ruas kanan, lalu dengan memperhatikan operasi matematika penjumlahan dan pengurangan yang digunakan pada persamaan tersebut, kita dapat menentukan jumlah *inputan* yang dibutuhkan, lalu dengan serangkaian proses aritmetika seperti proses integral dan derivatif, kita dapat memperoleh hasil seperti Gambar 3.2

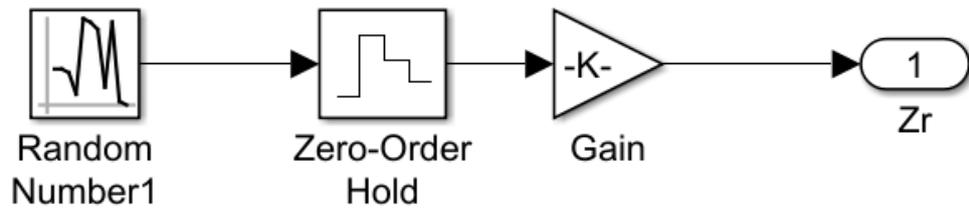
Profil jalan yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan dari referensi jurnal (Rajendiran & Lakshmi, 2016). Terdapat 2 profil jalan yang digunakan yaitu untuk polisi tidur dan jalan acak yang dapat dibentuk melalui persamaan (9) serta rangkaian Simulink yang telah dijelaskan pada Bab 2.4 Profil Jalan Simulasi. profil jalan acak dan polisi tidur dapat dilihat Gambar 3.3, dan Gambar 3.4, serta rangkaian Simulink yang telah diciptakan berdasarkan jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) dapat dilihat pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6



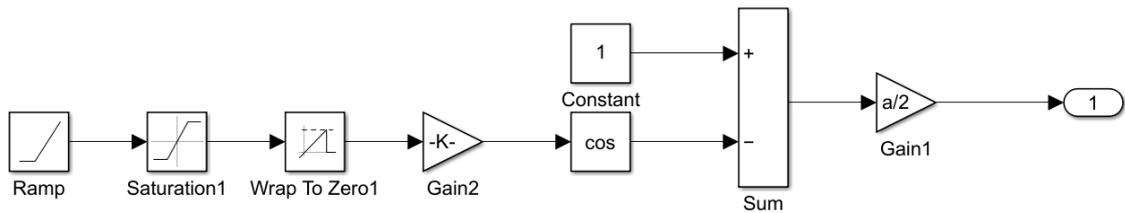
Gambar 3.3 Profil jalan Acak
(Rajendiran & Lakshmi, 2016)



Gambar 3.4 Profil jalan polisi tidur
(Rajendiran & Lakshmi, 2016)



Gambar 3.5 Rangkaian Simulink untuk kontur jalan acak

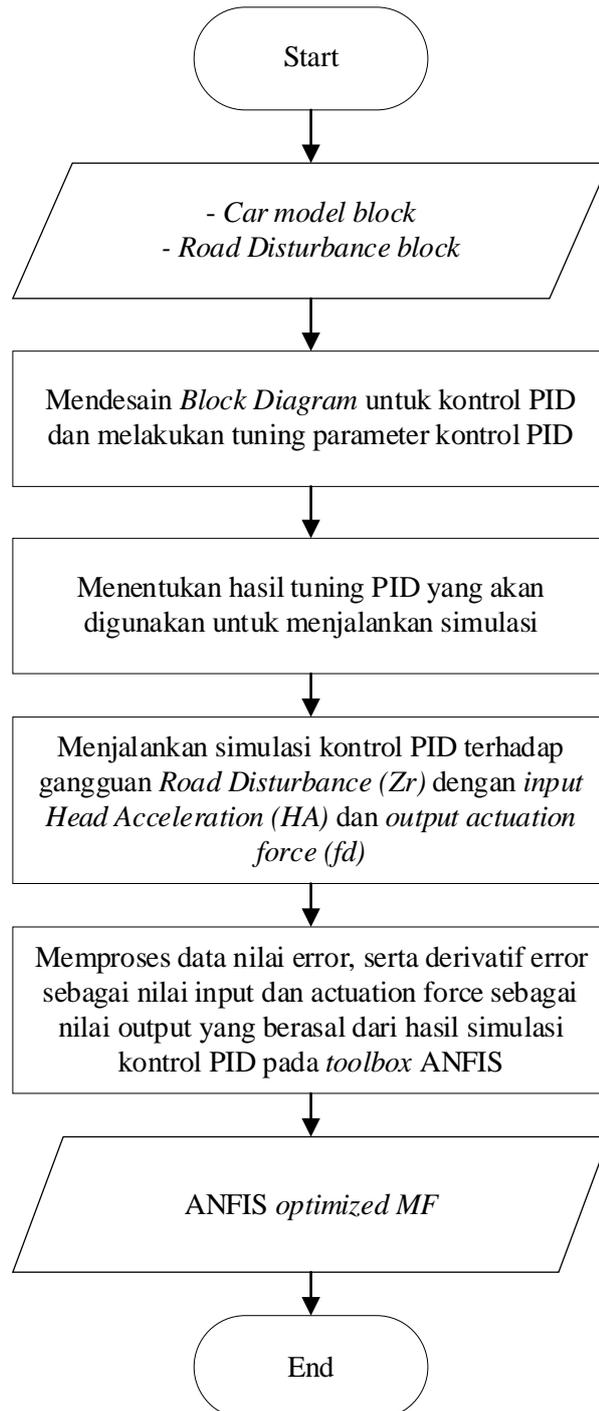


Gambar 3.6 Rangkaian Simulink untuk kontur jalan polisi tidur

Rangkaian Simulink pada kontur jalan acak dibangun tanpa persamaan dan hanya mengikuti deskripsi dari jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) yaitu dengan menggunakan *random number generator block*, lalu sinyal yang dihasilkan akan diproses oleh *zero order hold* dan sinyal akhir yang dihasilkan akan dikali kan dengan konstanta 0.0158. Sedangkan pada rangkaian kontur jalan polisi tidur, diberikan *input*/masukan awal yang berupa *ramp input* untuk menyimulasikan masukan waktu pada persamaan (10) dari 0 sampai dengan 0.24 detik, kemudian sinyal *ramp* akan dibatasi oleh sinyal *saturation* dengan batas 0.24 dan akan dibuat menjadi nol dengan *block wrap to zero*, hasil tersebut kemudian akan dikalikan dengan gain berupa nilai $\frac{2\pi v_0}{l}$ sebelum diproses oleh operator *cosinus*, kemudian sinyal tersebut akan mengurangi nilai 1, dan hasil pengurangan tersebut dikalikan dengan nilai gain $\frac{a}{2}$ untuk menghasilkan sinyal dengan kontur jalan polisi tidur. parameter kendaraan dan kontur jalan akan diambil dari jurnal referensi, dikarenakan oleh parameter real yang sukar diperoleh dan penelitian ini berfokus pada sistem kendali yang akan dirancang.

3.1.3 Pemodelan Kendali PID dan ANFIS

Kendali yang digunakan pada penelitian ini adalah kendali PID dan ANFIS. Kendali PID akan digunakan untuk menciptakan sumber data *input* pada kendali ANFIS. Kedua kendali tersebut akan dibuat menggunakan Simulink pada MATLAB. Pemilihan jenis kendali tersebut didasarkan pada penelitian (Changizi & Rouhani, 2011; Moaaz & Ghazaly, 2019) yang memperoleh hasil penelitian bahwa kendali FLC memiliki performa yang lebih stabil pada model kendaraan seperempat kendaraan dibandingkan dengan kendali PID. Sistematis pemodelan kedua kendali ini akan dibahas lebih lanjut pada diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 3.7.



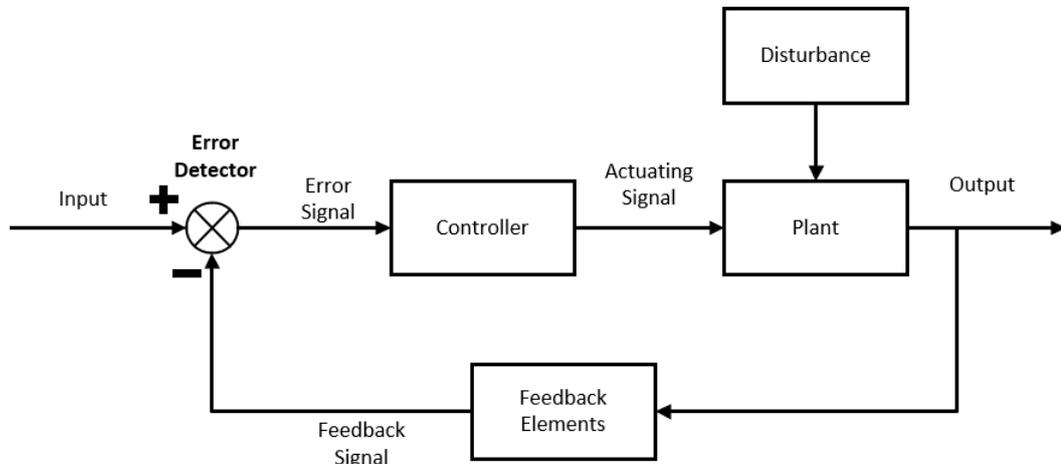
Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Pemodelan Kendali PID dan ANFIS

Data yang akan digunakan pada *toolbox* ANFIS merupakan data set yang dihasilkan oleh PID, parameter pada sistem kendali PID akan ditentukan melalui *toolbox* PID Tuner dengan batasan nilai *phase margin* 0° sampai dengan 90° dan *bandwith* sebesar 0 rad/s sampai dengan 100 rad/s, batas tersebut dipilih karena merupakan batas yang dimiliki pada *toolbox* PID Tuner. Lalu dengan parameter PID tersebut, kita dapat memperoleh parameter *input error* dan turunannya terhadap nilai percepatan kepala pengemudi (HA), dan parameter *output* berupa *actuation force* (f_d).

Parameter yang di optimasi pada *toolbox* ANFIS adalah jenis MF, jumlah MF yang digunakan, dan jumlah *epoch*/ pengulangan pada proses *training*/ pelatihan MF

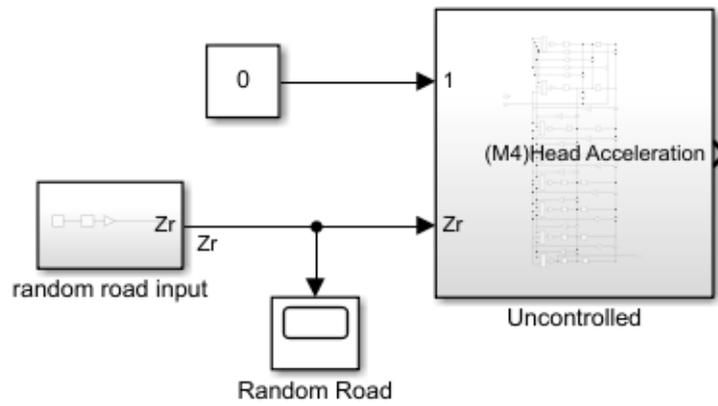
ANFIS. Tipe MF yang dipilih pada tahap optimasi adalah Triangular, Trapezoidal, Gaussian Bell (Gbell), dan Gaussian yang merupakan jenis MF dasar yang umumnya digunakan pada seluruh jenis sistem yang akan dikendalikan. Jumlah MF yang dipilih pada tahap optimasi sistem kendali ANFIS adalah 6 – 8, rentang tersebut dipilih karena berdasarkan penelitian terdahulu, jumlah MF yang optimal berjumlah 7 MF, sehingga penelitian ini akan mencari kemungkinan adanya sistem kendali yang lebih baik pada jumlah MF dengan rentang 6 – 8. Serta Jumlah *Epoch* yang akan digunakan awalnya akan berjumlah 100 *epoch*, dan apabila hasil simulasi masih belum memiliki hasil yang konvergen, maka jumlah *epoch* akan ditingkatkan, dan apabila terjadi *overfitting* yang ditandai dengan kenaikan nilai *error* pada saat *training/* pelatihan, maka jumlah *epoch* yang digunakan akan disesuaikan untuk memperoleh hasil yang konvergen.

Pemodelan sistem kendali didasarkan pada konsep loop tertutup untuk sistem kendali sederhana seperti gambar 3.8, dimana sebuah sistem memerlukan *controller/* sistem kendali, *Plant/* sistem yang akan dikendalikan, *disturbance/* gangguan eksternal dan *feedback elements/* parameter penilaian *error*. Pada penelitian ini, sistem kendali yang digunakan terdapat 4 yaitu, sistem kendali Passive, PID, Fuzzy, dan ANFIS; sedangkan sistem yang akan dikendalikan merupakan sistem suspensi aktif dengan rangkaian yang dapat dilihat pada gambar 3.2, serta *disturbance/* gangguan eksternal yang diberikan adalah kontur jalan acak dan polisi tidur dan *feedback element/* parameter penilaian yang digunakan adalah nilai percepatan kepala pengemudi/ *Head Acceleration* (HA), parameter penilaian tersebut dipilih karena merupakan parameter penelitian yang digunakan jurnal referensi acuan (Rajendiran & Lakshmi, 2016), sehingga nantinya hasil simulasi pada penelitian ini dapat dibandingkan dengan hasil pada jurnal referensi.

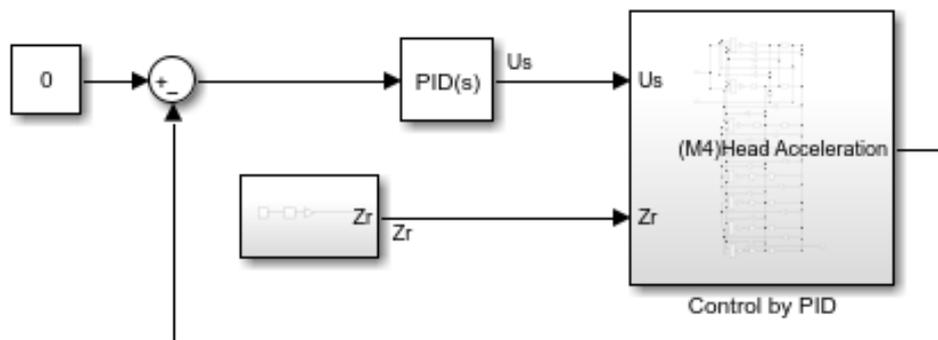


Gambar 3.8 Block diagram sistem kendali loop tertutup sederhana

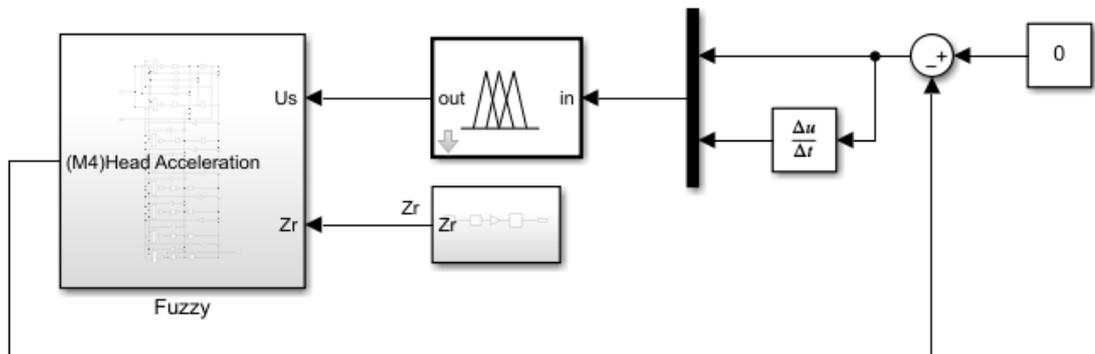
Dengan konsep tersebut, maka dapat diciptakan sistem kendali loop tertutup dengan sistem kendali Passive, PID, Fuzzy, dan ANFIS yang dapat dilihat pada gambar 3.9, 3.10, 3.11 dan 3.12.



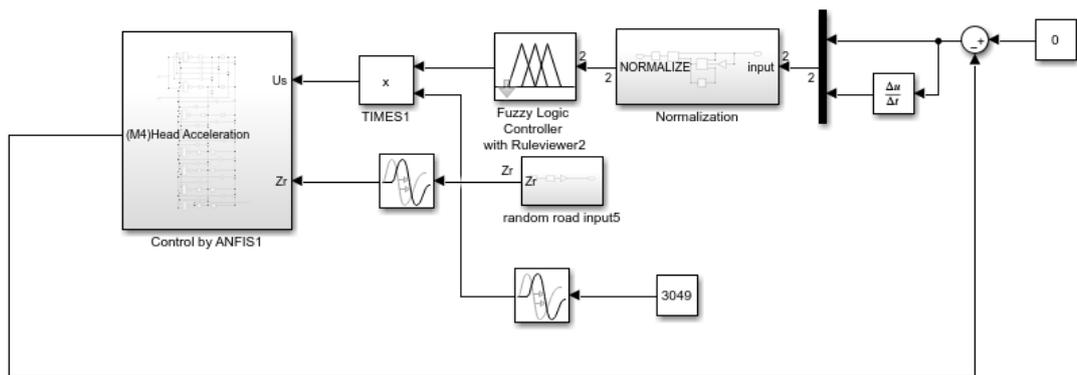
Gambar 3.9 Rangkaian Simulink *quarter-car model* dengan sistem kendali *Passive*



Gambar 3.10 Rangkaian Simulink *quarter-car model* dengan sistem kendali PID

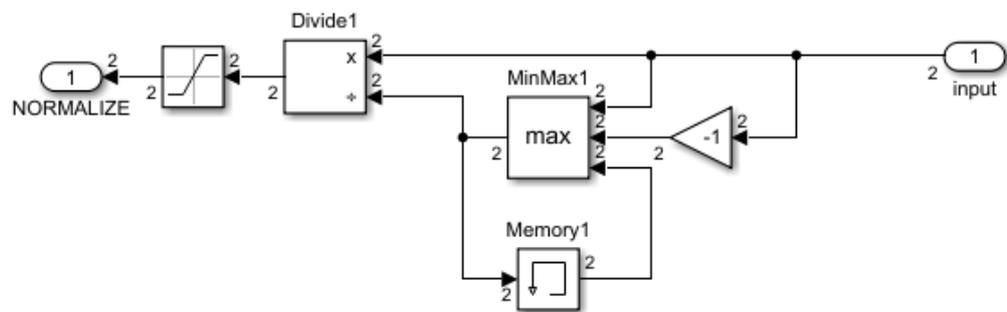


Gambar 3.11 Rangkaian Simulink *quarter-car model* dengan sistem kendali Fuzzy



Gambar 3.12 Rangkaian Simulink *quarter-car model* dengan sistem kendali ANFIS

Pada sistem kendali ANFIS, terdapat *block normalization* dan *block times/multiplier*. *Block normalization* berfungsi untuk menormalisasi *input*, hal ini dilakukan karena perbedaan dari kedua *input* yang cukup signifikan, sehingga ketika dilakukan simulasi, maka salah satu nilai *input* tersebut akan memiliki dampak yang lebih signifikan dibanding yang lainnya, hal ini menyebabkan *input* dengan nilai yang kecil menjadi terabaikan; untuk menyamakan *weight/ bobot* dari kedua *input*, maka perlu dilakukan normalisasi, sehingga kedua *input* memiliki rentang nilai dan bobot/ *weight* yang sama, yaitu nilai -1 sampai dengan 1. Lalu pada sistem ANFIS juga terdapat *times/ multiplier block* yang berfungsi sebagai pengali nilai *output* dari kendali ANFIS, hal ini bertujuan untuk mengembalikan nilai *output* yang telah dinormalisasi sebelumnya pada rentang yang sebenarnya sehingga dapat mengontrol sistem suspensi. Proses normalisasi ini juga dilakukan terhadap data awal yang akan di proses pada toolbox ANFIS. Detail *normalization block* dapat dilihat pada gambar 3.13



Gambar 3.13 Rangkaian Simulink yang digunakan untuk menormalisasi *input* pada sistem kendali ANFIS

Konsep yang digunakan pada block normalisasi adalah dengan cara membagi sinyal yang ada dengan sinyal maksimum yang dimiliki, hal ini menyebabkan seluruh sinyal untuk memiliki skala -1 sampai dengan 1. Untuk mengetahui nilai sinyal maksimum digunakan *block max*. *Block max* memiliki 3 jenis *input* yang akan diproses, yaitu *input* sinyal biasa, *input* sinyal yang dikali nilai -1, serta *input memory block*. Selain *input* sinyal biasa, untuk mengetahui nilai terbesar, dengan mempertimbangkan nilai negatif, perlu ditambahkan sinyal yang dikali dengan nilai -1, sehingga *block max* akan membandingkan kedua masukan tersebut dan menentukan sebuah nilai maksimum yang akan digunakan; sedangkan *block memory* berfungsi untuk mengembalikan *output* sinyal maksimum secara kontinu kepada *block max*

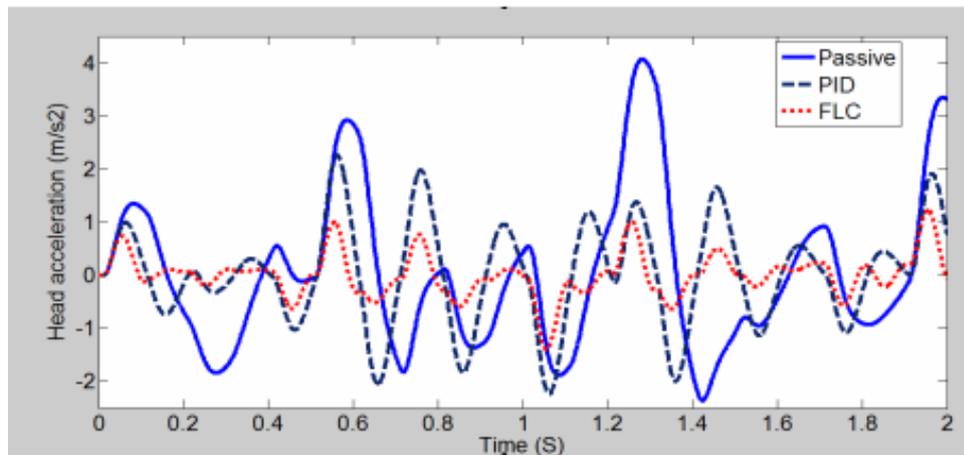
sehingga setelah nilai maksimum dari sinyal tersebut ditemukan nilai maksimum tersebut dapat dipertahankan terus menerus. *Block saturation* berfungsi untuk memberi nilai batas atas 1 dan batas bawah -1, apabila setelah proses normalisasi terdapat nilai yang lebih besar daripada 1, maka nilai tersebut akan dibulatkan menjadi 1, dan hal yang sama juga berlaku pada batas bawahnya yang bernilai -1, Langkah ini memastikan bahwa seluruh proses normalisasi terlaksana dengan baik.

3.1.4 Simulasi Membership Function ANFIS

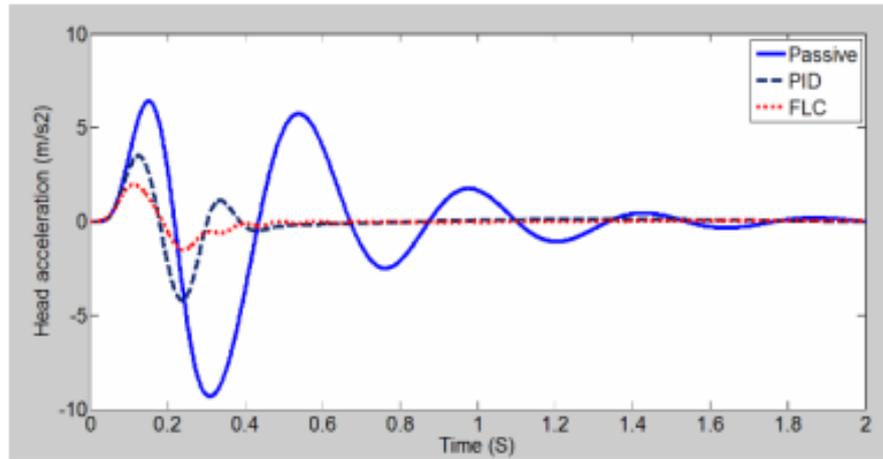
MF yang dihasilkan dari kendali ANFIS akan disimulasikan pada profil jalan acak, dan profil jalan polisi tidur yang telah dimodelkan pada tahap sebelumnya untuk memperoleh respons yang akan digunakan sebagai pembandingan dengan parameter yang akan diteliti adalah nilai RMS pada parameter *Head Acceleration* (HA) (Rajendiran & Lakshmi, 2016).

3.1.5 Verifikasi dan Komparasi Hasil

Parameter yang diperoleh dari proses simulasi akan dibandingkan dengan hasil dari penelitian sebelumnya pada jurnal (Rajendiran & Lakshmi, 2016). Berdasarkan penelitian terdahulu mengenai performansi dari kendali ANFIS, kendali ANFIS seharusnya akan memiliki performansi yang lebih bagus dibanding dengan kendali Fuzzy. Sehingga jika performa dari kendali ANFIS lebih tidak optimal dibandingkan dengan kendali Fuzzy dari jurnal referensi, maka akan dilakukan pengulangan pada tahap pemodelan Kendali PID, ANFIS, dan pembuatan data penelitian untuk kendali ANFIS. Parameter yang dimaksud sebagai lebih bagus adalah parameter yang memiliki nilai *Root Mean Square* (RMS) yang lebih kecil dibandingkan dengan parameter berdasarkan jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016). Parameter yang dimaksud dapat dilihat pada grafik hasil simulasi gambar 3.14 dan 3.15, dan nilai RMS dari masing – masing grafik pada tabel 3.1



Gambar 3.14 Performa kendali FLC dan PID berdasarkan penelitian (Rajendiran & Lakshmi, 2016) pada masukan profil jalan acak

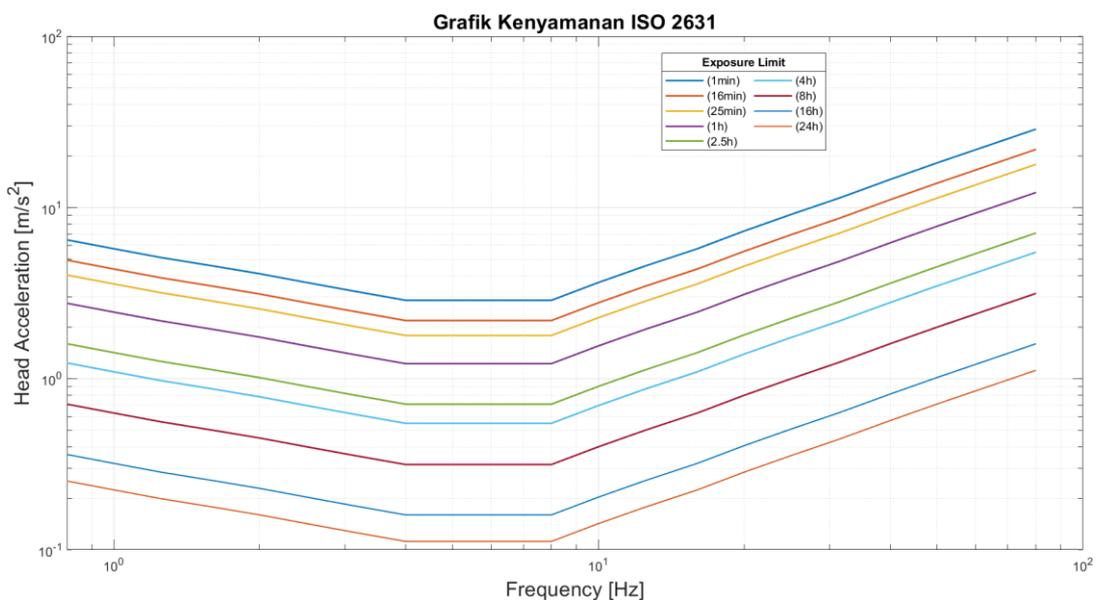


Gambar 3.15 Performa kendali FLC dan PID berdasarkan penelitian (Rajendiran & Lakshmi, 2016) pada masukan profil jalan polisi tidur

Tabel 3.1 Performa passive suspension system, dan kendali FLC berdasarkan penelitian (Rajendiran & Lakshmi, 2016)

Jenis Kendali	Nilai RMS berdasarkan jenis kontur jalan	
	Polisi tidur (m/s ²)	Jalan acak (m/s ²)
Passive	2.091	1.982
FLC	0.3228	0.421

Selain melakukan komparasi hasil dengan jurnal referensi, akan dilakukan juga komparasi dengan standar kenyamanan ISO 2631. Komparasi akan dilakukan dengan 2 metode yaitu berdasarkan nilai RMS dari HA untuk menentukan kategori kenyamanan seperti pada tabel 2.6, dan berdasarkan respons getaran terhadap frekuensi untuk menentukan ambang batas kenyamanan seperti pada gambar 2.16. Untuk kebutuhan penelitian ini, gambar 2.16 akan di replikasi pada MATLAB agar respons getaran yang dihasilkan oleh proses simulasi dapat dibandingkan terhadap ISO 2631, replikasi hasil grafik 2631 dapat dilihat pada gambar 3.16

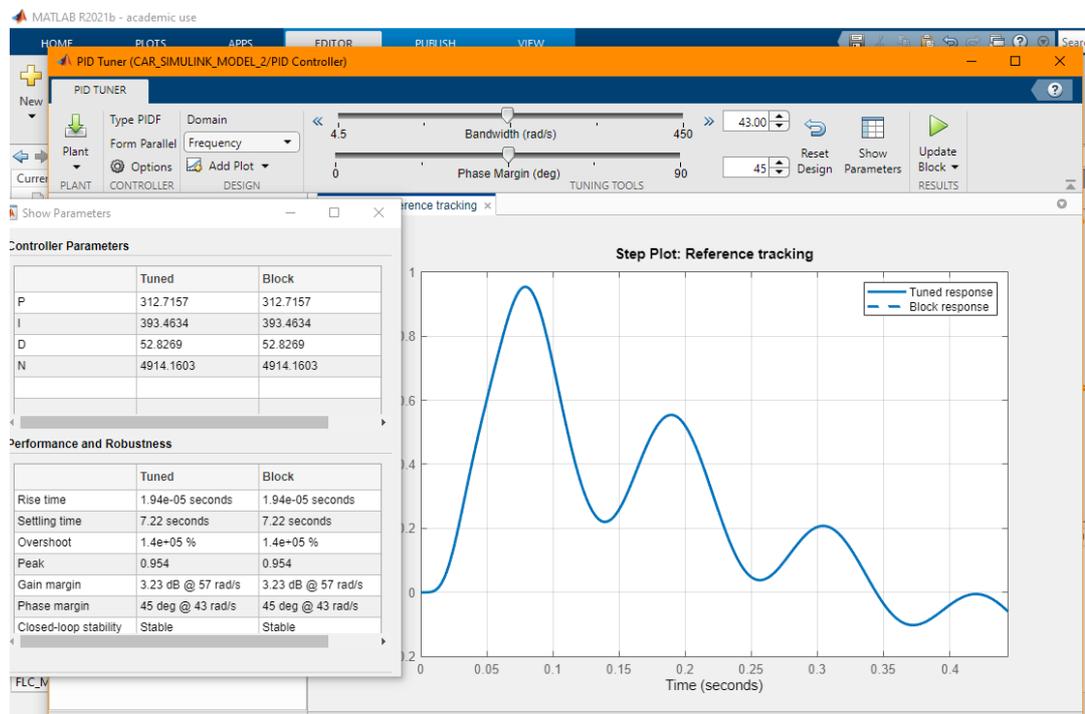


Gambar 3.16 Replikasi grafik kenyamanan ISO 2631 pada MATLAB

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

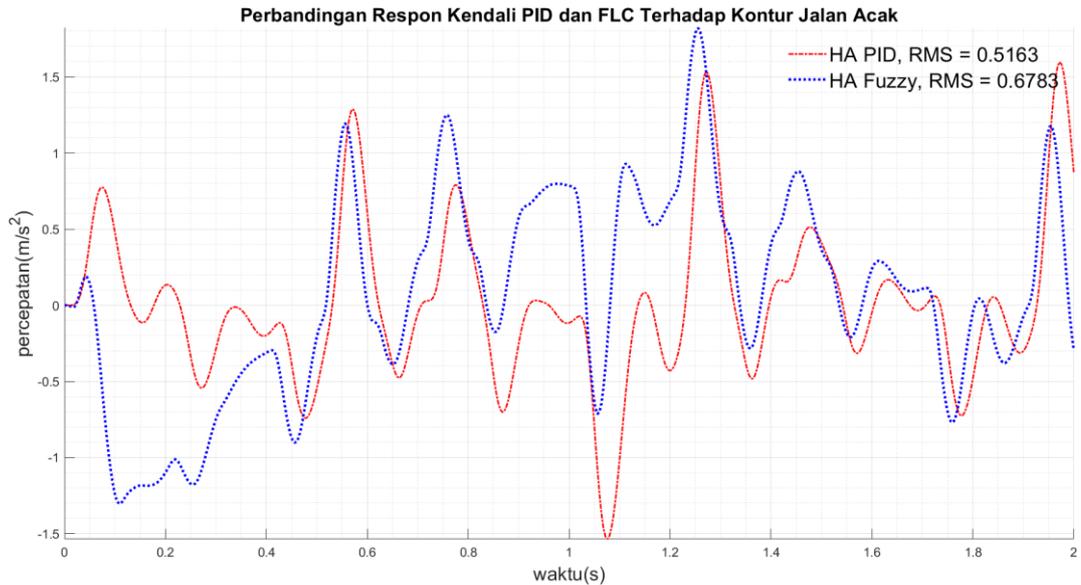
4.1 Performa sistem kendali suspensi aktif terhadap profil jalan acak

Untuk mencari performa sistem kendali ANFIS, kita perlu mencari terlebih dahulu performa sistem kendali PID yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali Fuzzy dan PID dari jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016), hal ini dikarenakan oleh data dari kendali PID tersebut nantinya akan digunakan sebagai *input* untuk menciptakan sistem kendali ANFIS. Parameter yang digunakan pada kendali PID diperoleh melalui proses uji coba pada toolbox PID Tuner, setelah melakukan beberapa kali proses uji coba, diperoleh parameter kendali PID $K_p = 312.7157$, $K_i = 393.4634$, dan $K_d = 52.8269$, serta $N = 4914.1603$ menghasilkan salah satu performa paling baik dapat dilihat pada gambar 4.1.



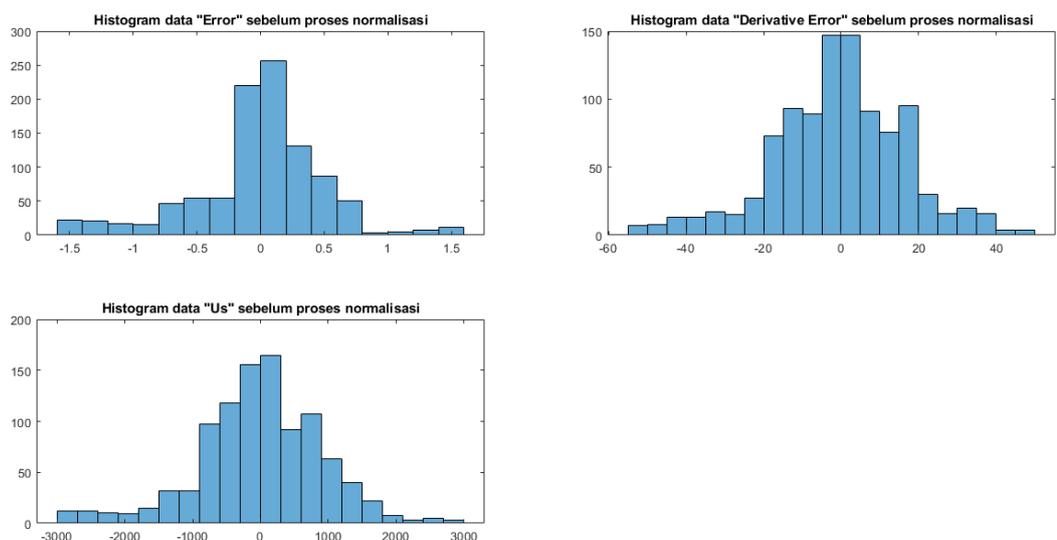
Gambar 4.1 Parameter pada sistem kendali PID

Proses validasi kemudian dilakukan untuk membuktikan bahwa parameter PID sudah lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali Fuzzy dengan melihat nilai RMS yang dimiliki ketika diberi *disturbance*/ gangguan berupa kontur jalan acak, dan diperoleh bahwa respons sistem kendali PID memiliki nilai RMS 0.5163 sedangkan sistem kendali Fuzzy memiliki nilai RMS 0.6783, sehingga sistem kendali PID yang digunakan sudah lebih baik daripada sistem kendali Fuzzy. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.2.

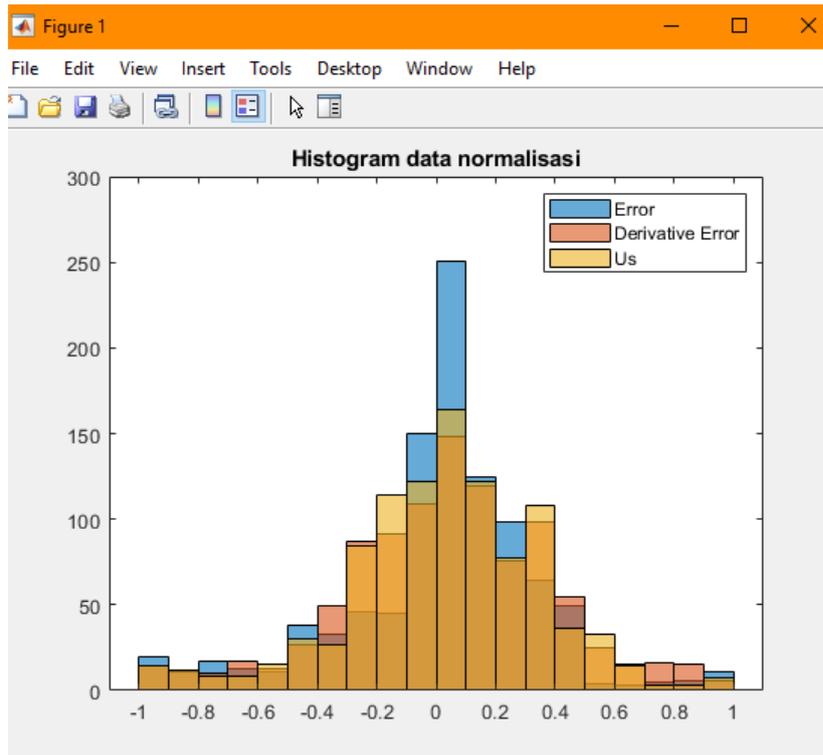


Gambar 4.2 Perbandingan Respon sistem kendali PID dan FLC terhadap kontur jalan acak.

Menggunakan parameter dari sistem kendali PID diatas, kita dapat memperoleh data yang akan kita berikan sebagai *input* pada sistem kendali ANFIS. Namun, karena data awal yang memiliki rentang berbeda, dimana data *error* sebagai nilai *input* pertama memiliki rentang -1.5 dan sampai dengan 1.5, data derivatif *error* sebagai nilai *input* kedua memiliki rentang -50an sampai dengan 40an, dan data *output* memiliki rentang -3000 sampai dengan 3000, sehingga untuk menyamakan rentang pada data tersebut agar bobot yang dimiliki oleh masing – masing *input* maupun *output* menjadi sama sebelum digunakan pada tahap pelatihan/ *training* sistem kendali ANFIS, dilakukan proses normalisasi dengan menggunakan *command* “*mapminmax*” yang menormalisasi *input* pada rentang -1 sampai dengan 1. Perbandingan histogram data yang telah di normalisasi, dan sebelum dinormalisasi dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4



Gambar 4.3 Histogram data sebelum proses normalisasi

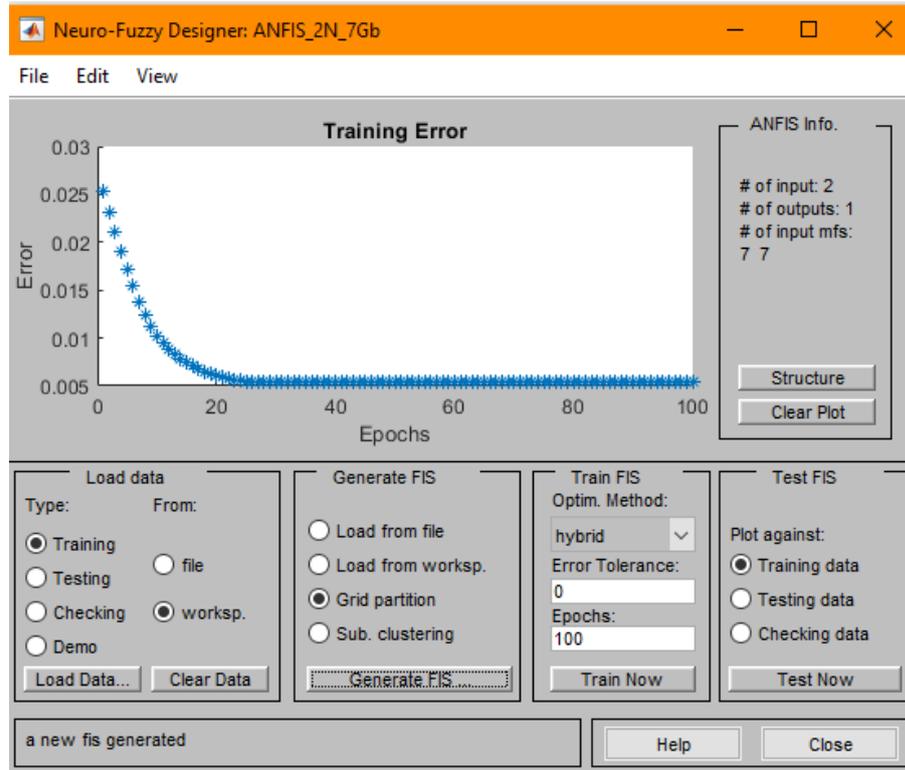


Gambar 4.4 Histogram data setelah proses normalisasi

Setelah proses normalisasi, kita akan menggunakan data tersebut pada tahap pembuatan MF pada sistem kendali ANFIS yang diperoleh dengan cara memasukkan data awal berupa 2 *input* (*error*, dan derivatif/ turunan dari *error*) serta 1 *output* (besar gaya). Setelah memasukkan nilai tersebut, kita akan menentukan jumlah MF yang digunakan dan jenis MF yang akan digunakan, pada penelitian ini, diperoleh salah satu hasil terbaik adalah dengan menggunakan parameter 7 MF pada tiap *input* dan menggunakan MF tipe Gauss Bell, parameter ini dipilih dengan mempertimbangkan nilai RMS yang terkecil dari parameter lainnya yang dapat dilihat pada tabel 4.1. Hasil pelatihan/ *training* ANFIS dapat dilihat pada gambar 4.5

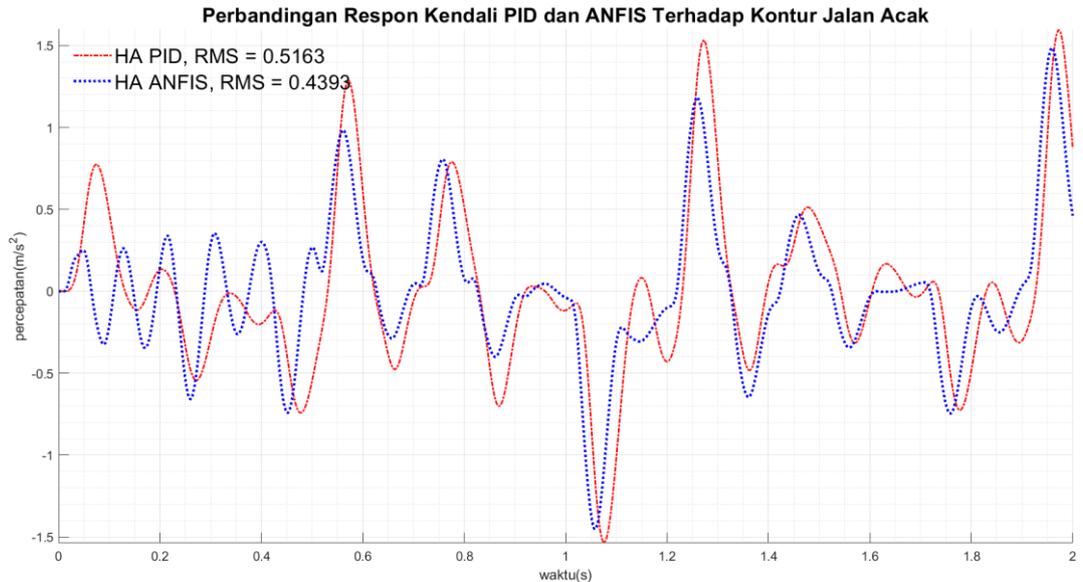
Tabel 4.1 *Design of Experiment* pengujian performa ANFIS dengan tipe dan jumlah MF yang berbeda terhadap nilai RMS HA

Tipe MF	Jumlah MF	RMS	Tipe MF	Jumlah MF	RMS
Triangular MF	6	1.1279	Gauss Bell MF	6	0.4434
	7	0.4456		7	0.4393
	8	0.4521		8	0.4508
Trapezoidal MF	6	1.45	Gauss MF	6	0.449
	7	0.4613		7	0.4470
	8	0.4511		8	0.4439



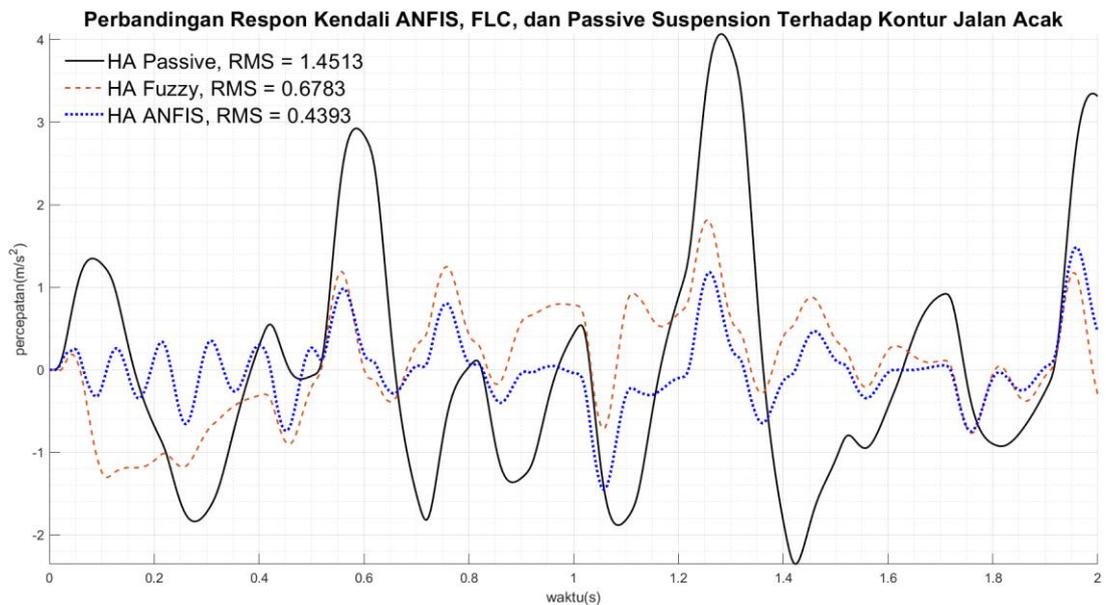
Gambar 4.5 Hasil pelatihan/ *training* ANFIS dengan parameter MF jenis Gauss Bell dan berjumlah 7 MF

Untuk memvalidasi hasil *training*/ pelatihan, MF yang dihasilkan dari toolbox ANFIS akan dibandingkan terhadap sistem kendali PID, penilaian tersebut akan dilakukan dengan membandingkan nilai dari RMS yang dihasilkan oleh sistem kendali ANFIS dengan sistem kendali PID, setelah perbandingan dilakukan, diperoleh bahwa respons sistem kendali ANFIS memiliki nilai RMS 0.4393 dibandingkan dengan nilai RMS PID adalah 0.5163, sehingga dapat disimpulkan bahwa sesuai dengan arah penelitian, sistem kendali ANFIS memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali PID. Gambar perbandingan performa kedua sistem kendali tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6 Perbandingan Respons Kendali PID dan ANFIS terhadap kontur jalan acak

Perbandingan hasil simulasi *quarter-car* terhadap profil jalan acak dengan sistem kendali Passive, FLC, serta ANFIS dengan detail nilai RMS pada masing – masing jenis kendali dapat dilihat pada gambar 4.7, dan perbandingan nilai RMS pada tiap sistem kendali dapat dilihat pada tabel 4.2

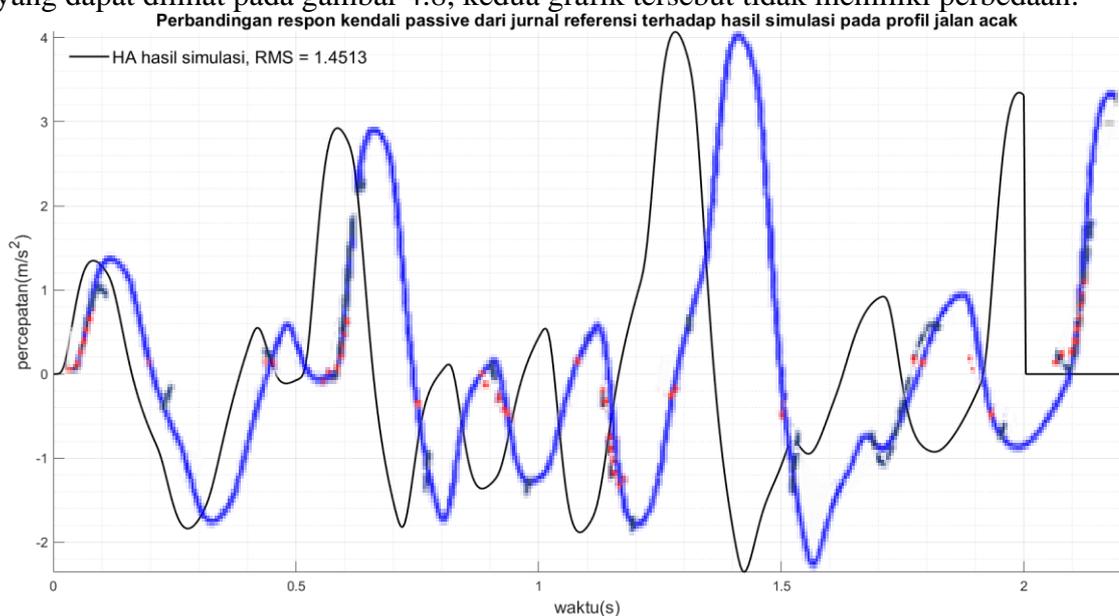


Gambar 4.7 Respons kendali ANFIS, FLC, dan Passive Suspension terhadap kontur jalan acak.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai RMS antara jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) dengan hasil simulasi pada kontur jalan acak

Nilai RMS berdasarkan jenis sistem kendali yang digunakan				
Controller	Jurnal Referensi	Persentase Reduksi	Hasil Simulasi	Persentase Reduksi
Passive	1.982	-	1.4513	-
FLC	0.421	78,76%	0.6783	53,26%
PID	0.8795	55,62%	0.5163	64,44%
ANFIS	-	-	0.4393	69,74%

Nilai RMS pada jurnal referensi pada kondisi suspensi pasif adalah 1.982, berbeda dengan nilai hasil RMS simulasi yaitu 1.4513, sehingga terdapat perbedaan diantara nilai RMS dari jurnal referensi dengan hasil simulasi walaupun melalui analisis secara visual yang dapat dilihat pada gambar 4.8, kedua grafik tersebut tidak memiliki perbedaan.



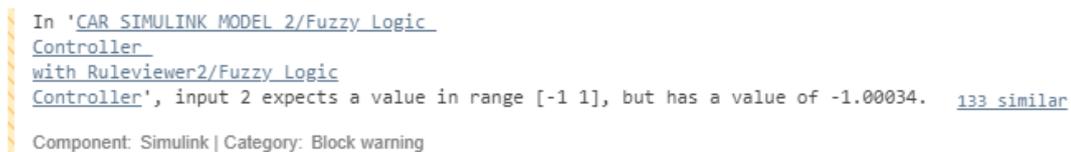
Gambar 4.8 Grafik perbandingan hasil simulasi dengan jurnal referensi (garis biru buram merupakan grafik respons dari jurnal referensi)

Untuk memperoleh grafik analisis ini, mula – mula grafik dari jurnal referensi (gambar 3.14) akan di proses dengan menghilangkan grafik respons sistem kendali PID, Fuzzy serta keterangan sumbu x dan y, lalu grafik yang hanya menyisakan garis respons sistem pasif akan ditaruh diatas respons grafik dari hasil simulasi dengan titik pangkal yang berbeda sejauh 0,2 detik. Disimpulkan bahwa hasil simulasi yang diperoleh sudah mirip dengan hasil simulasi dari jurnal referensi, namun nilai RMS yang diperoleh, berbeda dengan nilai RMS dari jurnal referensi, sehingga pada penelitian ini, hasil yang akan digunakan sebagai acuan adalah hasil simulasi.

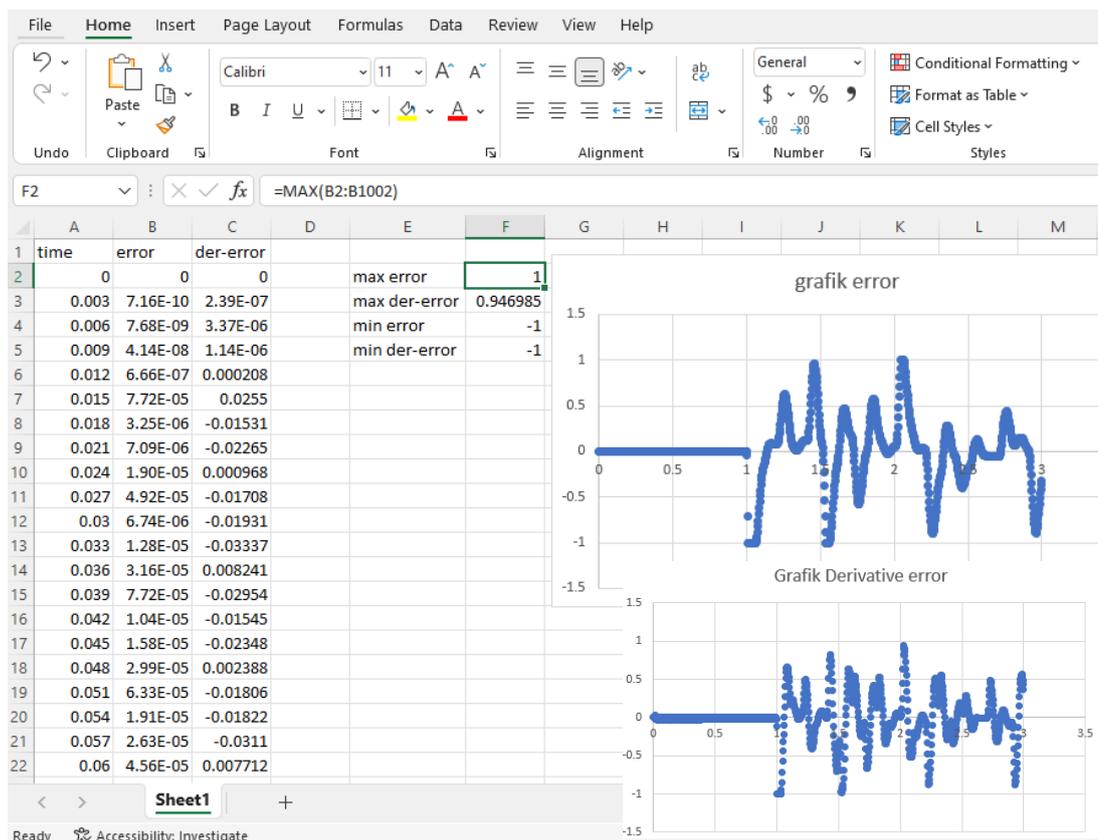
Pada jurnal referensi, nilai RMS mengalami penurunan sebanyak 78,76% ketika sistem diberikan kendali FLC, dan penurunan sebanyak 55,62% pada sistem kendali PID. Sedangkan pada hasil simulasi penurunan yang terjadi hanya sebesar 53.26% saat diberi sistem kendali FLC. Dikarenakan hal tersebut, penulis mengambil acuan nilai RMS dari simulasi yang akan dibandingkan dengan performa dari kendali ANFIS. Ketika sistem diberikan kendali ANFIS, penurunan RMS yang dialami adalah sebesar 69,74%, bertambah lebih dari 10% terhadap kendali FLC. Penurunan ini melebihi kendali PID

yang dirancang dengan penurunan nilai RMS sebanyak 64,44% dari model kendaraan pasif.

Pada tahap simulasi, terdapat fluktuatif pada saat normalisasi parameter *input* sebelum diproses pada sistem kendali ANFIS, normalisasi data yang dilakukan seharusnya akan memastikan seluruh *input* memiliki rentang -1 sampai dengan 1, tetapi pada saat simulasi dijalankan, beberapa *input* memiliki nilai yang diluar rentang normalisasi tersebut. Namun ketika parameter tersebut dianalisis, tidak terdapat data yang melewati rentang normalisasi -1 s.d. 1, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses normalisasi berhasil dilakukan. Kejadian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9 berupa *warning/* peringatan dari Simulink dan hasil analisis parameter *input* yang telah dinormalisasi dapat dilihat pada gambar 4.10



Gambar 4.9 Error berupa parameter *input* yang berada diluar rentang normalisasi



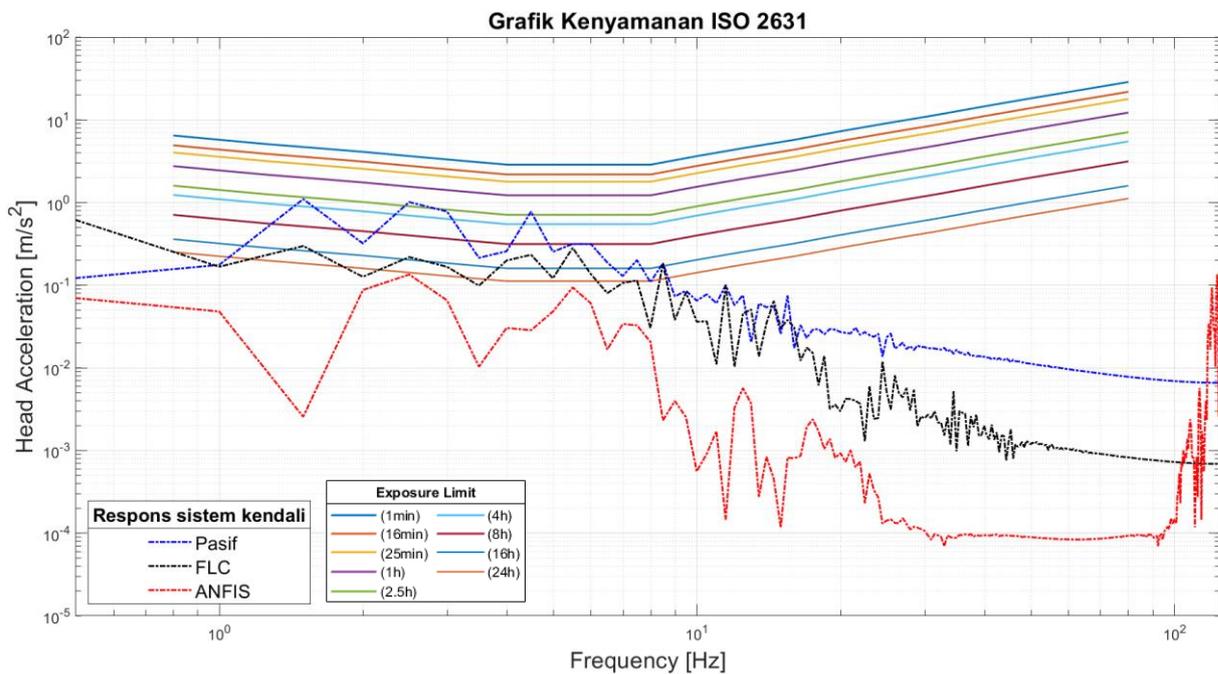
Gambar 4.10 Hasil analisis parameter *input* yang telah dinormalisasi

Untuk menentukan standar kenyamanan pada masing – masing sistem kendali, akan dilakukan perbandingan terhadap ISO 2631 melalui tabel 2.6 dan gambar 2.16. Berdasarkan hasil RMS yang diperoleh, kenyamanan masing – masing sistem kendali dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Respons sistem kendali terhadap standar kenyamanan ISO 2631

Jenis Sistem kendali	Nilai RMS (m/s^2)	Keterangan kenyamanan
Pasif	1.4513	Sangat tidak nyaman – kategori 5
FLC	0.6783	Cukup tidak nyaman – kategori 3
ANFIS	0.4393	Sedikit tidak nyaman – kategori 2

Sistem kendali Pasif memiliki kategori kenyamanan 5, kendali FLC memiliki kategori kenyamanan 3, dan kendali ANFIS memiliki kategori kenyamanan 2. ANFIS berhasil meningkatkan kenyamanan dengan menurunkan nilai RMS dari kategori 5 pada sistem kendali pasif dan kategori 3 dari sistem kendali FLC menjadi kategori 2. Adapun perbandingan lain yang dilakukan terhadap grafik ISO 2631 melalui grafik hasil replikasi pada MATLAB seperti pada gambar 3.16 akan dijelaskan lebih lanjut pada gambar 4.11



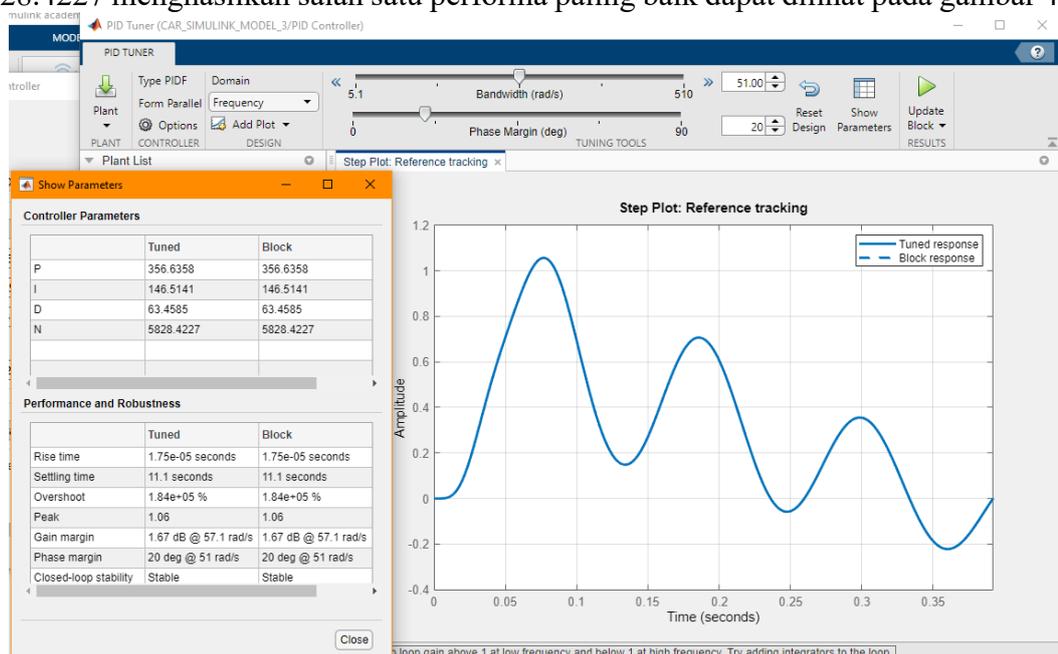
Gambar 4.11 Perbandingan respons sistem kendali terhadap profil jalan acak dengan grafik ISO 2631

Dari hasil perbandingan respons HA terhadap grafik ISO 2631, diperoleh bahwa sistem kendali Pasif memiliki batas waktu paparan di bawah 2,5 jam, sistem kendali FLC memiliki batas waktu paparan hampir selama 8 jam, dan sistem kendali ANFIS memiliki batas waktu paparan yang paling lama, yaitu 24 jam. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dari seluruh aspek yang dinilai pada penelitian ini, yaitu nilai RMS, dan standar kenyamanan ISO 2631, sistem kendali ANFIS mampu menghasilkan hasil yang paling baik dibandingkan dengan sistem kendali lainnya pada profil jalan acak.

4.2 Performa sistem kendali suspensi aktif terhadap profil jalan polisi tidur

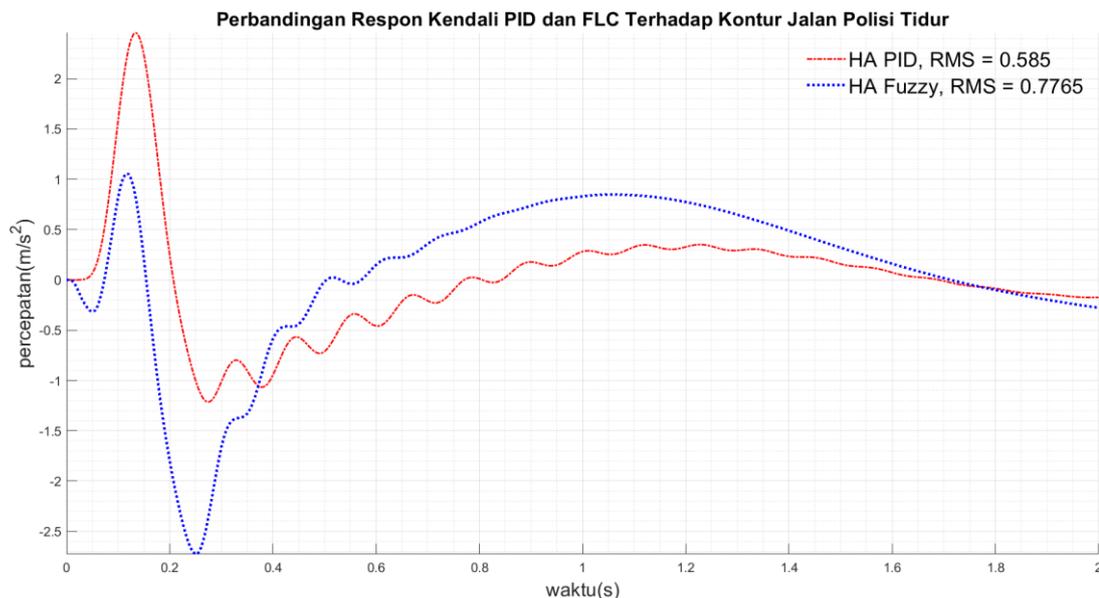
Untuk mencari performa sistem kendali ANFIS, kita perlu mencari terlebih dahulu performa sistem kendali PID yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali Fuzzy dan PID dari jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016), hal ini dikarenakan oleh data dari kendali PID tersebut nantinya akan digunakan sebagai *input* untuk menciptakan sistem kendali ANFIS. Parameter yang digunakan pada kendali PID diperoleh melalui proses uji coba pada toolbox PID Tuner dengan memperhatikan performa dari parameter

hasil, setelah melakukan beberapa kali proses uji coba, diperoleh bahwa diperoleh parameter kendali PID $K_p = 356.6358$, $K_i = 146.5141$, dan $K_d = 63.4585$, serta $N = 5828.4227$ menghasilkan salah satu performa paling baik dapat dilihat pada gambar 4.12.



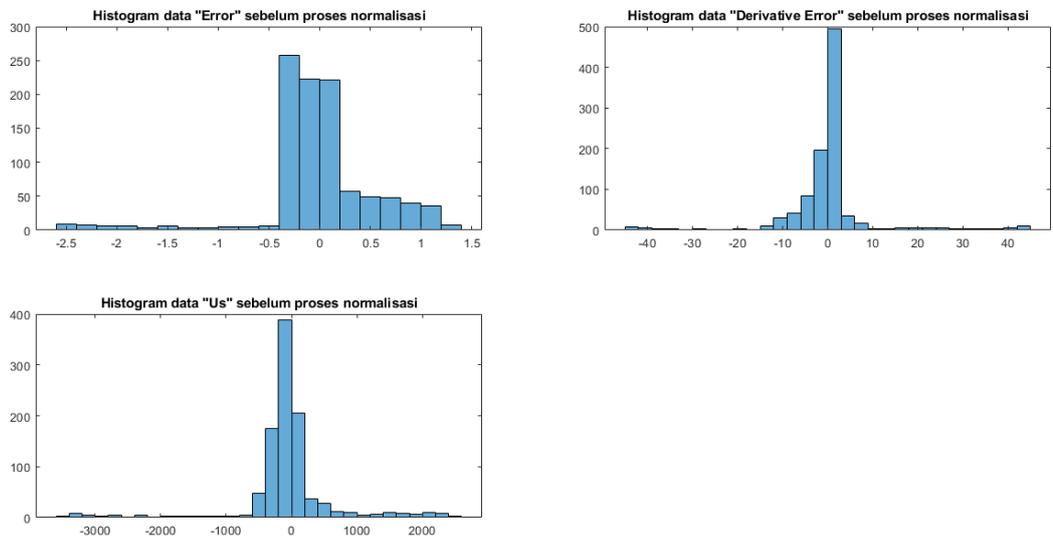
Gambar 4.12 Parameter pada kendali PID

Proses validasi bahwa parameter PID tersebut sudah lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali Fuzzy dilakukan dengan melihat nilai RMS yang dimiliki ketika diberi *disturbance/* gangguan berupa kontur jalan polisi tidur, dan diperoleh bahwa respons sistem kendali PID memiliki nilai RMS 0.585 sedangkan sistem kendali Fuzzy memiliki nilai RMS 0.7765, sehingga sistem kendali PID yang digunakan sudah lebih baik daripada sistem kendali Fuzzy. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar 4.13.

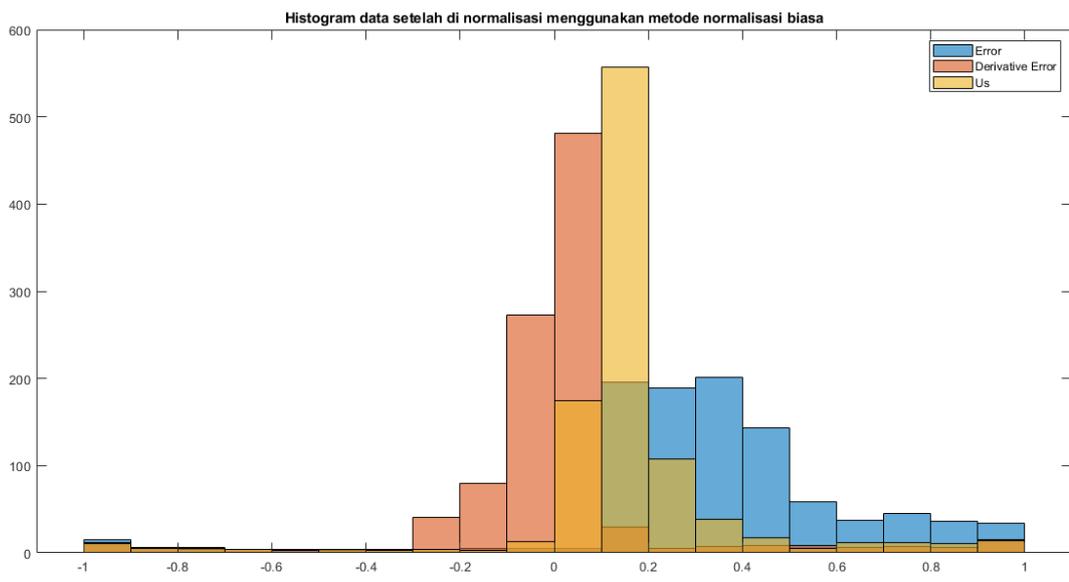


Gambar 4.13 Perbandingan Respons sistem kendali PID dan FLC terhadap kontur jalan polisi tidur.

Menggunakan Parameter dari sistem kendali PID di atas, kita dapat memperoleh data yang akan kita berikan sebagai *input* pada sistem kendali ANFIS. Namun, karena data awal yang memiliki rentang berbeda, dimana data *error* sebagai nilai *input* pertama memiliki rentang -2.5 dan sampai dengan 1.5, data derivatif *error* sebagai nilai *input* kedua memiliki rentang -40 sampai dengan 40, dan data *output* memiliki rentang -3000 sampai dengan 2000an, sehingga untuk menyamakan rentang pada data tersebut agar bobot yang dimiliki oleh masing – masing bobot menjadi sama dan dapat digunakan pada tahap pelatihan/ *training* sistem kendali ANFIS, dilakukan proses normalisasi, namun proses normalisasi yang dilakukan berbeda dengan data pada kontur jalan acak, hal ini disebabkan oleh data yang diperoleh dari kontur jalan polisi tidur berbeda dengan data dari kontur jalan acak, perbedaan yang dimiliki adalah distribusi data yang tidak normal yang dapat dilihat pada gambar 4.14 dan 4.15 dimana data “*Error*” condong terdistribusi pada sisi kanan, dan data “*Derivative Error*” condong terdistribusi pada sisi kiri.



Gambar 4.14 Histogram data sebelum proses normalisasi

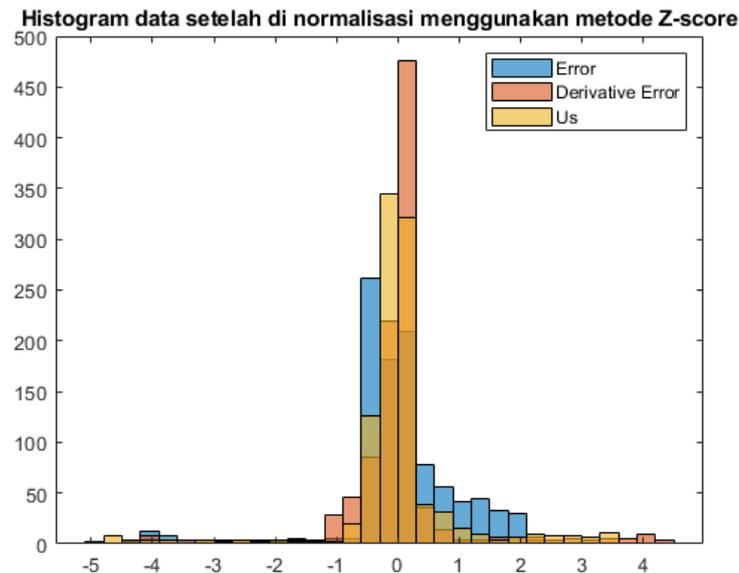


Gambar 4.15 Histogram data yang menggunakan metode normalisasi biasa

Untuk menormalisasikan data yang tidak terdistribusi secara normal ini, kita tidak bisa menggunakan persamaan normalisasi seperti persamaan (9), untuk menormalisasikan data tersebut, kita menggunakan metode *z-score normalization* dimana persamaan matematis yang digunakan adalah

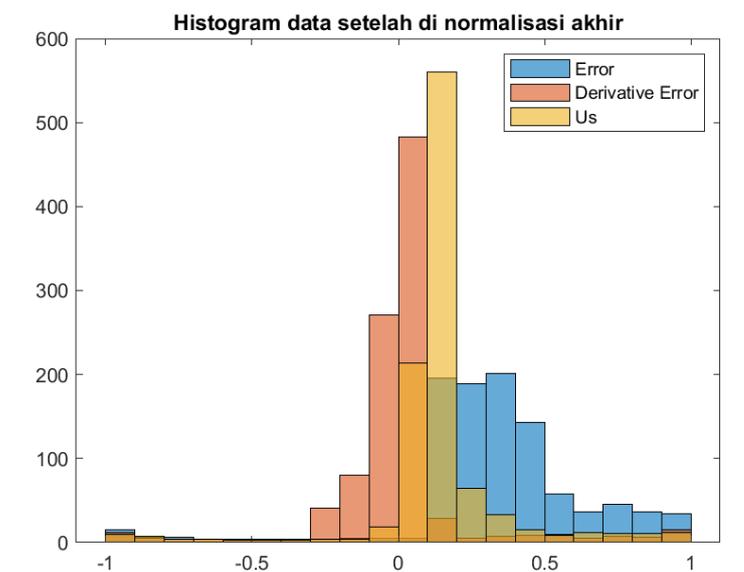
$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (24)$$

Dimana x adalah data yang akan diolah, μ adalah *mean*/ rata - rata data yang akan diolah, dan σ adalah deviasi standar dari data tersebut. Hasil normalisasi menggunakan metode *z-score normalization* dapat dilihat pada gambar 4.16



Gambar 4.16 Histogram data setelah menggunakan metode *z-score normalization*

Setelah menggunakan metode *z-score normalization*, data tersebut sudah memiliki distribusi normal, namun data tersebut masih belum jatuh dalam rentang -1 sampai dengan 1, dengan menggunakan command "*mapminmax*" pada MATLAB. Hasil normalisasi tersebut dapat dilihat pada gambar 4.17

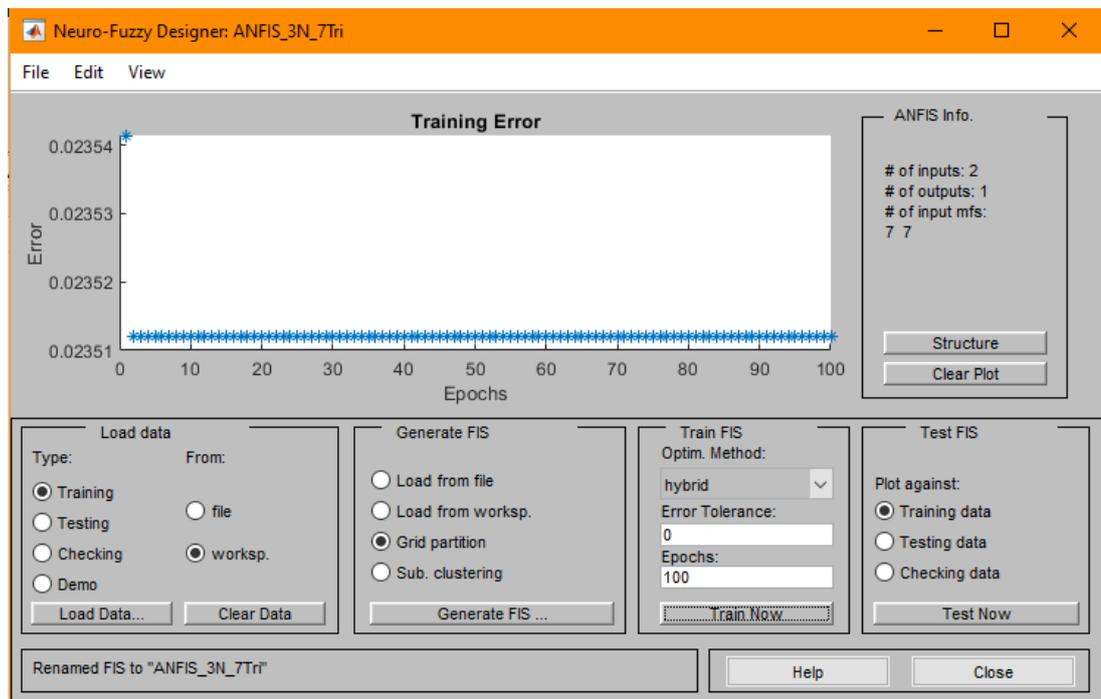


Gambar 4.17 Histogram data setelah proses normalisasi

Setelah proses normalisasi, kita akan menggunakan data tersebut pada tahap pembuatan MF pada sistem kendali ANFIS yang diperoleh dengan cara memasukkan data awal berupa 2 *input* (*error*, dan derivatif/ turunan dari *error*) serta 1 *output* (besar gaya). setelah memasukkan nilai tersebut, kita akan menentukan jumlah MF yang digunakan dan jenis MF yang akan digunakan, pada penelitian ini, diperoleh salah satu hasil terbaik adalah dengan menggunakan parameter 7 MF pada tiap *input* dan menggunakan MF tipe Triangle, parameter ini dipilih dengan mempertimbangkan nilai RMS yang terkecil dari parameter lainnya yang dapat dilihat pada tabel 4.4. Hasil pelatihan/ *training* ANFIS dapat dilihat pada gambar 4.18

Tabel 4.4 *Design of Experiment* pengujian performa ANFIS dengan tipe dan jumlah MF yang berbeda terhadap nilai RMS HA

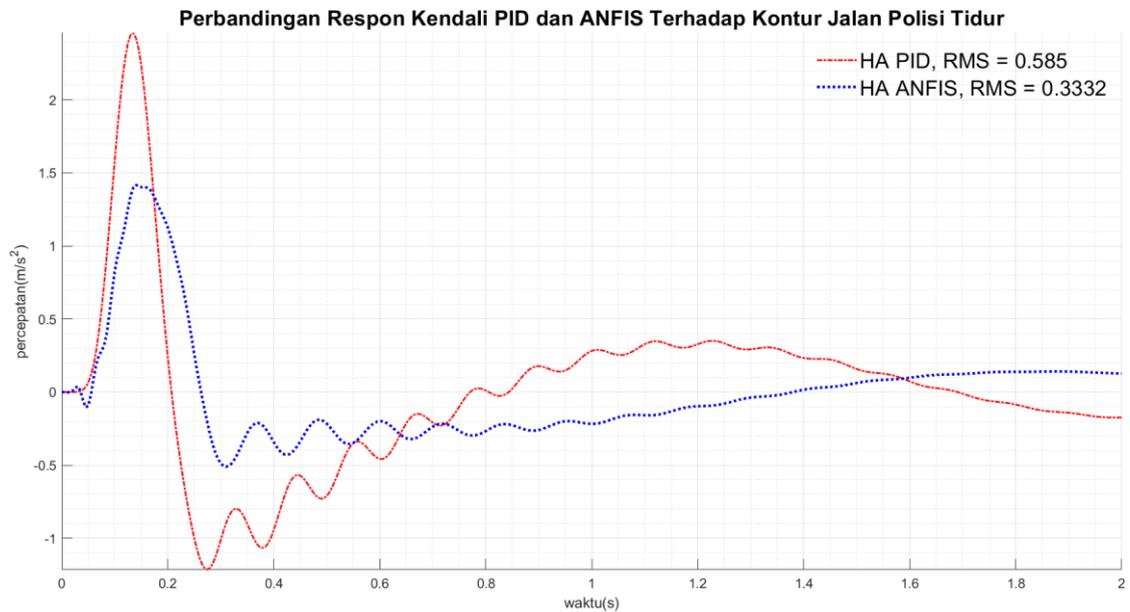
Tipe MF	Jumlah MF	RMS	Tipe MF	Jumlah MF	RMS
Triangular MF	6	0.3353	Gauss Bell MF	6	0.9629
	7	0.3332		7	32.3588
	8	0.5702		8	12.2353
Trapezoidal MF	6	1.4538	Gauss MF	6	4.6108
	7	4.1791		7	4.0721
	8	1.6563		8	28.6172



Gambar 4.18 Hasil pelatihan/ *training* ANFIS

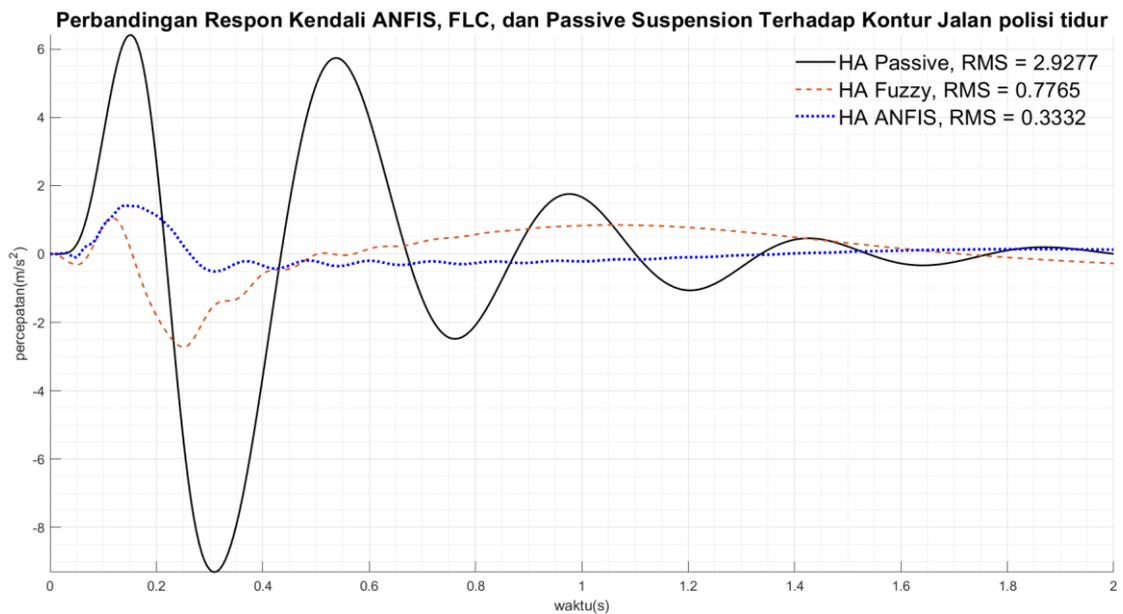
Untuk memvalidasi hasil *training*/ pelatihan, MF yang dihasilkan dari toolbox ANFIS akan dibandingkan terhadap sistem kendali PID, penilaian tersebut akan dilakukan dengan membandingkan nilai dari RMS yang dihasilkan oleh sistem kendali ANFIS dengan sistem kendali PID, setelah perbandingan dilakukan, diperoleh bahwa respons sistem kendali ANFIS memiliki nilai RMS 0.3332 dibandingkan dengan nilai

RMS PID adalah 0.585, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem kendali ANFIS tersebut memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan sistem kendali PID. Gambar perbandingan performa kedua sistem kendali tersebut dapat dilihat pada gambar 4.19



Gambar 4.19 Perbandingan Respons Kendali PID dan ANFIS Terhadap Kontur Jalan Polisi Tidur

Perbandingan hasil simulasi *quarter-car* terhadap profil jalan polisi tidur dengan sistem kendali Passive, FLC, serta ANFIS dengan detail nilai RMS pada masing – masing jenis kendali dapat dilihat pada gambar 4.20, dan perbandingan nilai RMS pada tiap sistem kendali dapat dilihat pada tabel 4.5

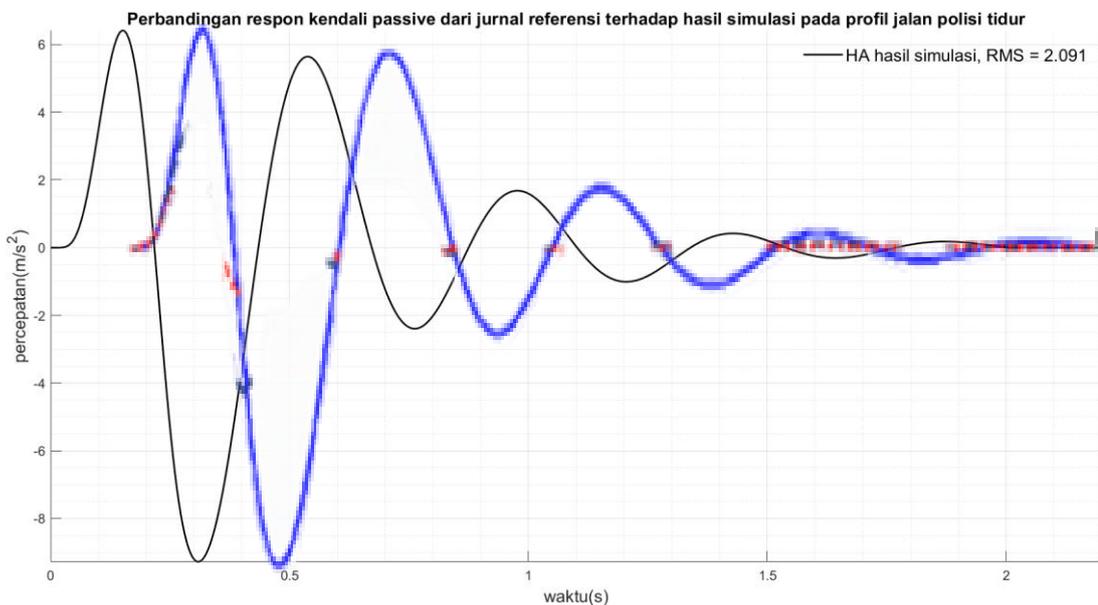


Gambar 4.20 Respons kendali ANFIS, FLC, dan Passive Suspension terhadap kontur jalan polisi tidur

Tabel 4.5 Perbandingan nilai RMS antara jurnal referensi (Rajendiran & Lakshmi, 2016) dengan hasil simulasi pada kontur jalan polisi tidur

Kontur jalan polisi tidur				
Controller	Jurnal Referensi	Persentase Reduksi	Hasil Simulasi	Persentase Reduksi
Passive	2.091	-	2.9277	-
FLC	0.3228	84,56%	0.7765	73,62%
PID	0.6786	67,54%	0.585	80,2%
ANFIS	-	-	0.3332	88,62%

Nilai RMS pada jurnal referensi pada kondisi pasif adalah 2.091, berbeda dengan nilai hasil RMS simulasi yaitu 2.9277 Sama seperti pada kontur jalan acak, dimana terdapat perbedaan diantara nilai RMS dari jurnal referensi dengan hasil simulasi walaupun melalui analisis secara visual seperti pada gambar 4.21 kedua grafik tersebut tidak memiliki perbedaan



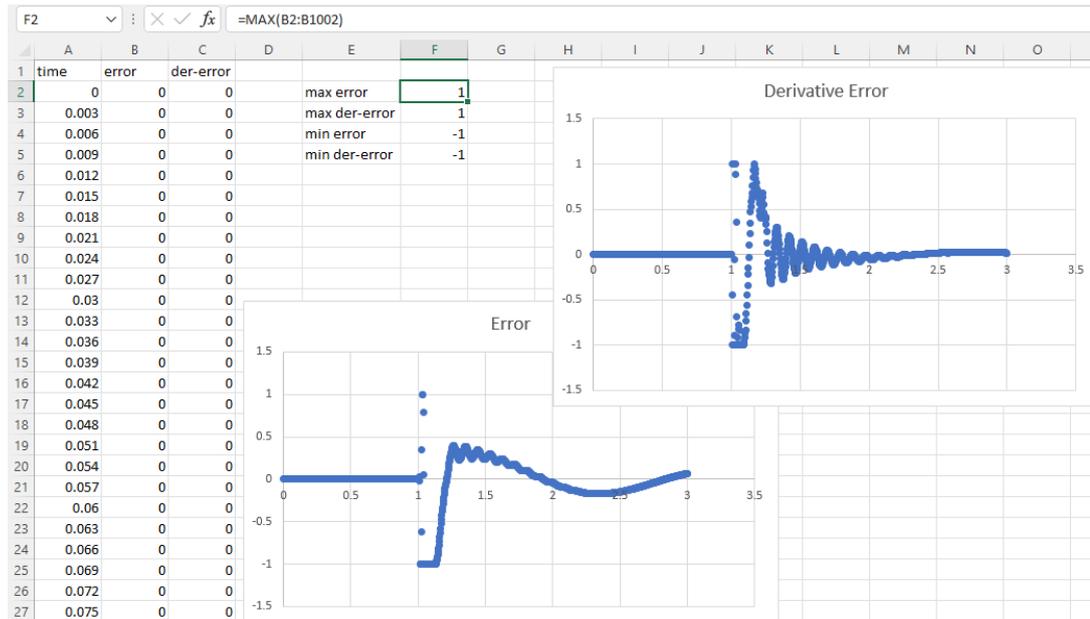
Gambar 4.21 Grafik perbandingan hasil simulasi dengan jurnal referensi (garis biru buram merupakan grafik respons dari jurnal referensi)

Metode yang dilakukan untuk membandingkan kedua grafik tersebut juga sama seperti pada kontur jalan acak, dan pada kontur jalan polisi tidur, hasil yang akan digunakan sebagai acuan adalah hasil simulasi. Pada jurnal referensi, nilai RMS mengalami penurunan sebanyak 84,56% ketika sistem diberikan kendali FLC, dan penurunan sebanyak 67,54% pada sistem kendali PID. Sedangkan pada hasil simulasi, penurunan yang terjadi hanya sebesar 73,62% saat diberi sistem kendali FLC. Dikarenakan hal tersebut, penulis mengambil acuan nilai RMS dari simulasi yang akan dibandingkan dengan performa dari kendali ANFIS. Ketika sistem diberikan kendali ANFIS, penurunan RMS yang dialami menjadi 88,62%, bertambah lebih dari 10% terhadap kendali FLC. Penurunan nilai RMS ini melebihi dari kendali PID yang menjadi sumber data dari kendali ANFIS, dimana pada kendali PID, penurunan yang dialami hanya sebesar 80.2%. sama seperti pada kontur jalan acak, fluktuatif data pada saat normalisasi *input* terjadi pula, Kejadian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.22 berupa

warning/ peringatan dari Simulink dan hasil analisis parameter *input* yang telah dinormalisasi dapat dilihat pada gambar 4.23

```
In 'CAR SIMULINK MODEL 3/Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer/Fuzzy Logic Controller', input 2 expects a value in range [-1 1], but has a value of -1.00227.
Component: Simulink | Category: Block warning
```

Gambar 4.22 Error berupa parameter *input* yang berada diluar rentang normalisasi



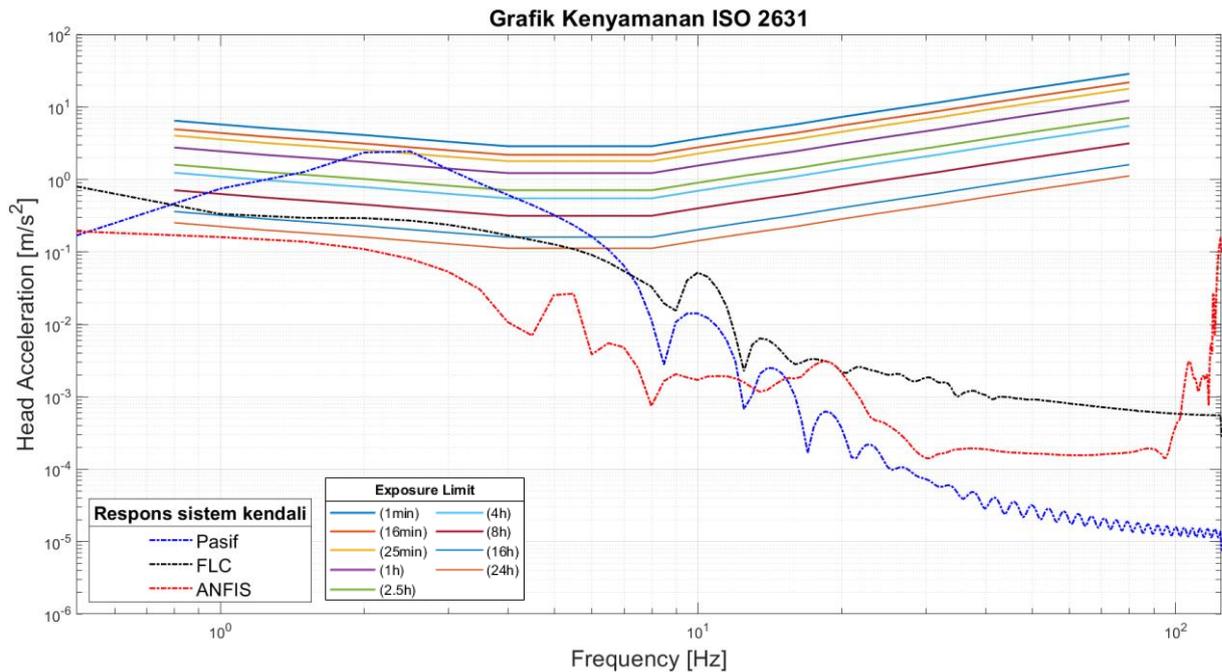
Gambar 4.23 Hasil analisis parameter *input* yang telah dinormalisasi

Untuk menentukan standar kenyamanan pada masing – masing sistem kendali, akan dilakukan perbandingan terhadap ISO 2631 melalui tabel 2.6 dan gambar 2.16. berdasarkan hasil RMS yang diperoleh pada profil jalan polisi tidur, diperoleh kenyamanan masing – masing sistem kendali yang dapat dilihat pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Respons sistem kendali pada profil jalan polisi tidur terhadap standar kenyamanan ISO 2631

Jenis Sistem kendali	Nilai RMS (m/s ²)	Keterangan kenyamanan
Pasif	2.9277	Amat Sangat tidak nyaman – kategori 6
FLC	0.7765	Cukup tidak nyaman – kategori 3
ANFIS	0.3332	Sedikit tidak nyaman – kategori 2

Sistem kendali Pasif memiliki kategori kenyamanan 6, kendali FLC memiliki kategori kenyamanan 3, dan kendali ANFIS memiliki kategori kenyamanan 2. ANFIS berhasil meningkatkan kenyamanan dengan menurunkan nilai RMS dari kategori 6 pada sistem kendali pasif dan kategori 3 dari sistem kendali FLC menjadi kategori 2. Adapun perbandingan lain yang dilakukan terhadap grafik ISO 2631 melalui hasil replikasi pada MATLAB seperti pada gambar 3.16 akan dijelaskan lebih lanjut pada gambar 4.24



Gambar 4.24 Perbandingan respons sistem kendali pada profil jalan polisi tidur dengan grafik ISO 2631

Dari hasil perbandingan respons HA terhadap grafik ISO 2631, diperoleh bahwa sistem kendali Pasif memiliki puncak batas waktu paparan di bawah 25 menit, sistem kendali FLC memiliki batas waktu paparan hampir selama 16 jam, dan sistem kendali ANFIS memiliki batas waktu paparan yang paling lama, yaitu 24 jam. Walaupun kontur jalan polisi tidur hanya terjadi sekali pada periode tertentu, hasil grafik di atas memperlihatkan kenyamanan yang dirasakan oleh seorang pengendara apabila kontur jalan tersebut terjadi secara berulang kali seperti pada jalur yang belum diaspal/ jalur *off-road*. Kesimpulan yang diperoleh adalah bahwa dari seluruh aspek yang dinilai pada penelitian ini, yaitu nilai RMS, dan standar kenyamanan ISO 2631; sistem kendali ANFIS mampu menghasilkan hasil yang paling baik dibandingkan dengan sistem kendali lainnya pada profil jalan polisi tidur.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Parameter PID yang diperoleh dari PID Tuner pada kontur jalan acak adalah $K_p = 312.7157$, $K_i = 393.4634$, $K_d = 52.8269$, dan $N = 4914,1603$; dan parameternya pada kontur jalan polisi tidur adalah $K_p = 356.6358$, $K_i = 146.5141$, $K_d = 63.4585$, dan $N = 5828.4227$.
2. Kendali ANFIS memiliki 7 MF pada setiap *input* sehingga menghasilkan 49 peraturan/ *rule* dengan jenis MF yang digunakan adalah *gauss bell* MF pada kontur jalan acak (*Random Road*), dan *triangle* MF pada kontur jalan polisi tidur (*Single Bump*). Nilai RMS yang dihasilkan adalah 0.4393 pada kontur jalan acak (*Random Road*) dan 0.3332 pada kontur jalan polisi tidur (*Single Bump*).
3. Baik pada kontur jalan acak maupun kontur jalan polisi tidur, performa ANFIS merupakan yang paling unggul dengan persentase reduksi sebanyak 69.74% pada kontur jalan acak dan 88.62% pada kontur jalan polisi tidur.
4. Baik pada profil jalan acak, maupun profil jalan polisi tidur, sistem kendali ANFIS memiliki standar kenyamanan yang paling balik diantara sistem kendali lainnya, dengan kategori kenyamanan sedikit tidak nyaman (kategori nomor 2) dan ambang batas paparan yang lebih dari 24 jam. Sistem kendali FLC memiliki kategori kenyamanan cukup tidak nyaman (kategori nomor 3) pada kedua profil jalan dan ambang batas paparan hampir 8 jam pada profil jalan acak, dan hampir 16 jam pada profil jalan polisi tidur. Sedangkan sistem kendali Pasif memiliki respons kenyamanan terburuk dengan kategori kenyamanan sangat tidak nyaman (kategori nomor 5) pada profil jalan acak, dan sangat amat tidak nyaman (kategori nomor 6) pada profil jalan polisi tidur, serta ambang batas paparan yang diperbolehkan kurang dari 2,5 jam pada profil jalan acak dan pada profil jalan polisi tidur, ambang batas paparannya adalah 25 menit

5.2 Saran

Dari penelitian tugas akhir ini, terdapat beberapa saran baik untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Memahami aplikasi MATLAB Simulink secara lebih baik.
2. Melakukan uji validasi dengan aplikasi langsung pada model nyata yang ada.
3. Melakukan penelitian yang serupa pada model kendaraan yang lebih kompleks
4. Melakukan penelitian yang serupa dengan sumber *database* yang lebih baik dibandingkan kendali PID.
5. Melakukan penelitian dengan parameter awal dan kontur jalan yang berasal dari model nyata yang ada.
6. Melakukan penelitian untuk membandingkan performa BPNN dengan ANFIS.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Alfiati, W. (2017). PERAMALAN PENJUALAN PIPA DI PT. CIKAL TIRTA SARANA SURAKARTA DENGAN MENGGUNAKAN ALOGARITMA ARTIFICIAL NEURAL NETWORK. *Undefined*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/PERAMALAN-PENJUALAN-PIPA-DI-PT.-CIKAL-TIRTA-SARANA-Alfiati/b061416f713141f6decfb9de074d599317f11109>
- Alvarez, D., Cerezo-Hernández, A., López-Muñiz, G., Castro, T., Albi, T., Hornero, R., & del Campo, F. (2017). *Usefulness of Artificial Neural Networks in the Diagnosis and Treatment of Sleep Apnea-Hypopnea Syndrome* (pp. 33–68).
<https://doi.org/10.5772/66570>
- Amer, M., El-Kassaby OR ELKASABY, M., & Abdelghaffar, W. (2017). A universal suspension test rig for electrohydraulic active and passive automotive suspension system. *Alexandria Engineering Journal*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.01.024>
- Araujo, V., Guimarães, A., Campos Souza, P., Rezende, T., & Araujo, V. (2019). Using Resistin, Glucose, Age and BMI and Pruning Fuzzy Neural Network for the Construction of Expert Systems in the Prediction of Breast Cancer. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1. <https://doi.org/10.3390/make1010028>
- Bansal, H. (2009). Tuning of PID Controllers using Simulink. *International Journal of Mathematical Modeling, Simulation and Applications*.
- Changizi, N., & Rouhani, M. (2011). Comparing Pid And Fuzzy Logic Control A Quarter-car Suspension System. *Journal of Mathematics and Computer Science*, 2, 559–564. <https://doi.org/10.22436/jmcs.02.03.18>
- C.K., B., & Kannan, P. (2006). A Novel Approach for ATC Computation in Deregulated Environment. *Journal of Electrical Systems*, 2.
- Danko, J., Milesich, T., & Bucha, J. (2017). Nonlinear Model of the Passenger Car Seat Suspension System. *Journal of Mechanical Engineering*, 67. <https://doi.org/10.1515/scjme-2017-0002>
- Dernoncourt, F. (2013). *Introduction to fuzzy logic*.
- Famili, A., Shen, W.-M., Weber, R., & Simoudis, E. (1997). Data Preprocessing and Intelligent Data Analysis. *Intelligent Data Analysis*, 1(1), 3–23. <https://doi.org/10.3233/IDA-1997-1102>
- Gandhi, P., Sasidharan, A., & Ramachandran, K. I. (2017). Performance Analysis of Half Car Suspension Model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS Controllers. *Procedia Computer Science*, 115, 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.070>
- Grenier, S., Eger, T., & Dickey, J. (2010). Predicting discomfort scores reported by LHD operators using whole-body vibration exposure values and musculoskeletal pain scores. *Work (Reading, Mass.)*, 35, 49–62. <https://doi.org/10.3233/WOR-2010-0957>
- Griffin, M. (2007). Discomfort from feeling vehicle vibration. *Vehicle System Dynamics - VEH SYST DYN*, 45, 679–698. <https://doi.org/10.1080/00423110701422426>
- Hu, Y., Chen, M. Z. Q., & Shu, Z. (2014). Passive vehicle suspensions employing inerters with multiple performance requirements. *Journal of Sound and Vibration*, 333(8), 2212–2225. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2013.12.016>
- Jang, J.-S. (1993). ANFIS Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions On*, 23, 665–685. <https://doi.org/10.1109/21.256541>
- Kaur, A., & Kaur, A. (2012). *Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System*. 2(2), 3.

- Khodadadi, H. (2018). Self-tuning PID controller design using fuzzy logic for half car active suspension system. *International Journal of Dynamics and Control*, 6. <https://doi.org/10.1007/s40435-016-0291-5>
- Kılıç, E., Yılmaz, Ş., Özçalık, H. R., & Şit, S. (2015). A comparative analysis of FLC and ANFIS controller for vector controlled induction motor drive. *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical Electronic Equipment (OPTIM) 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*, 102–106. <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2015.7426971>
- Kothandaraman, R., & Lakshmi, P. (2010). *PSO Optimized Fuzzy Logic Controller for Active Suspension System*. 278–283. <https://doi.org/10.1109/ARTCom.2010.22>
- Mahmoodabadi, M., & Nejadkourki, N. (2020). Optimal fuzzy adaptive robust PID control for an active suspension system. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1734154>
- Mansfield, N., & Whiting-Lewis, E. (2004). Low Frequency Lateral Acceleration and Subjective Ratings of Acceleration Intensity and Driving Confidence in Production Cars. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control - J LOW FREQ NOISE VIB ACT CONT*, 23, 221–230. <https://doi.org/10.1260/0263-0923.23.4.221>
- Ming, L., Yibin, L., Xuewen, R., Shuaishuai, Z., & Yanfang, Y. (2020). Semi-Active Suspension Control Based on Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 8, 9978–9986. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964116>
- Moazz, A., & Ghazaly, N. (2019). *Fuzzy and PID Controlled Active Suspension System and Passive Suspension System Comparison*. 1721–1729.
- Moghadam-Fard, H., & Samadi, F. (2015). Active Suspension System Control Using Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) Controller. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 28, 396–401. <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2015.28.03c.08>
- Özkan, G., & İnal, M. (2014). Comparison of neural network application for fuzzy and ANFIS approaches for multi-criteria decision making problems. *Applied Soft Computing*, 24, 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.06.032>
- Panduru, K., Riordan, D., & Walsh, J. (2014). *Fuzzy Logic Based Intelligent Energy Monitoring and Control for Renewable Energy* (Vol. 2014). <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0666>
- Patro, S. G. K., & Sahu, K. K. (2015). *Normalization: A Preprocessing Stage* (arXiv:1503.06462). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1503.06462>
- Pekgökgöz, R., Gurel, M., Bilgehan, M., & Kisa, M. (2010). Active suspension of cars using fuzzy logic controller optimized by genetic algorithm. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2.
- Plewa, K. M., Eger, T. R., Oliver, M. L., & Dickey, J. P. (2012). Comparison between ISO 2631–1 Comfort Prediction Equations and Self-Reported Comfort Values during Occupational Exposure to Whole-Body Vehicular Vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 31(1), 43–53. <https://doi.org/10.1260/0263-0923.31.1.43>
- Pouliakis, A., Karakitsou, E., Margari, N., Bountris, P., Haritou, M., Panayiotides, J., Koutsouris, D., & Karakitsos, P. (2016). Artificial Neural Networks as Decision Support Tools in Cytopathology: Past Present and Future. *Biomed Eng Comput Biol*, 2016, 1–18. <https://doi.org/10.4137/BECB.S31601>
- Rajendiran, S., & Lakshmi, P. (2016). Simulation of PID and fuzzy logic controller for integrated seat suspension of a quarter car with driver model for different road profiles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(10), 4565–4570. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0927-6>

- Sekulić, D., Dedović, V., Rusov, S., Šalinić, S., & Obradović, A. (2013). Analysis of vibration effects on the comfort of intercity bus users by oscillatory model with ten degrees of freedom. *Applied Mathematical Modelling*, 37(18), 8629–8644. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.060>
- Senthil Kumar, P., Sivakumar, K., Kanagarajan, R., & Kuberan, S. (2018). Adaptive Neuro Fuzzy Inference System control of active suspension system with actuator dynamics. *Journal of Vibroengineering*, 20(1), 541–549. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18379>
- Sharkawy, A.-N., Ali, A., Ghazaly, N., & Abdel-Jaber, G. (2015). PID CONTROLLER OF ACTIVE SUSPENSION SYSTEM FOR A QUARTER CAR MODEL. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Vol. 8, 899–909.
- Shehata, A., Metered, H., & Oraby, W. A. H. (2015). Vibration Control of Active Vehicle Suspension System Using Fuzzy Logic Controller. In J. K. Sinha (Ed.), *Vibration Engineering and Technology of Machinery* (pp. 389–399). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09918-7_35
- Singh, D. (2017). Passenger Seat Vibration Comparison Using ANFIS Control in Active Quarter Car Model. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 11, 1373–1378.
- Singh, D. (2018). Modeling and control of passenger body vibrations in active quarter car system: A hybrid ANFIS PID approach. *Internatonal Journal of Dynamics and Control*, 6. <https://doi.org/10.1007/s40435-018-0409-z>
- Talib, H., & Mat Darus, I. (2013). *Self-tuning PID controller for active suspension system with hydraulic actuator*. 86–91. <https://doi.org/10.1109/ISCI.2013.6612381>
- Wang, Q., Zhao, Y., Xu, H., & Deng, Y. (2019). Adaptive backstepping control with grey signal predictor for nonlinear active suspension system matching mechanical elastic wheel. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 131, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.05.046>
- Wuryandari, M. D., & Afrianto, I. (2013). PERBANDINGAN METODE JARINGAN SYARAF TIRUAN BACKPROPAGATION DAN LEARNING VECTOR QUANTIZATION PADA PENGENALAN WAJAH. *TEKNIK INFORMATIKA*, Vol. 1 No. 1. <http://komputa.if.unikom.ac.id/jurnal/perbandingan-metode-jaringan.7>

BIODATA PENULIS



Tommy, merupakan anak ke empat dari lima bersaudara, putra kandung dari pasangan Bapak Herry Fu dan Ibu Merry, lahir di Aceh 25 Mei 2000. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di TK, SD, SMP dan SMA Sutomo 1 Medan. Setelah lulus dari jenjang SMA pada tahun 2018, penulis melanjutkan studinya di jurusan Teknik Mesin FT-IRS ITS pada tahun 2018 melalui jalur SBMPTN dan terdaftar dengan NRP 02111840000119.

Semasa kuliah, penulis pernah aktif dalam kegiatan organisasi dan kepanitiaan pada organisasi Tim Pembina Kerohanian Buddha (TPKB). Pada organisasi tersebut, Penulis pernah menjadi staf di bidang kewirausahaan dan posisi terakhir yang diisi oleh penulis adalah bendahara. Penulis juga pernah mencoba untuk mengikuti program kreativitas mahasiswa (PKM) pada tahun 2020 namun gagal pada tahap pendanaan. Pada saat semester 8, penulis mengikuti Program Magang Mahasiswa Bersertifikat (PMMB) yang diselenggarakan oleh FHCI BUMN dan ditempatkan di PT Terminal Teluk Lamong yang merupakan anak perusahaan dari PT Pelabuhan Indonesia. Rumpun ilmu yang dipilih oleh penulis pada penelitian tugas akhir adalah bidang manufaktur. Apabila terdapat pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis, dapat melalui email: tommyfu00@gmail.com.